

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství

Katedra tepelné techniky

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství

Katedra tepelné techniky

**Vliv přebytku vzduchu na spalnou teplotu paliv v teplárně
TAMEH Ostrava s.r.o**

The influence of excess air to the combustion temperature of
fuels at the heating plant TAMEH Ostrava s.r.o

Student:

Bc. Radim Přasličák

Vedoucí diplomové práce:

doc. Ing. Zuzana Klečková, CSc.

Ostrava 2016

Zadání diplomové práce

Student:

Bc. Radim Přasličák

Studijní program:

N2109 Metalurgické inženýrství

Studijní obor:

2109T039 Tepelná technika a keramické materiály

Téma:

Vliv přebytku vzduchu na spalnou teplotu paliv v teplárně TAMEH
Ostrava s.r.o.

The influence of excess air to the combustion temperature of fuels at the
heating plant TAMEH Ostrava s.r.o.

Jazyk vypracování:

čeština

Zásady pro vypracování:

1. Primární opatření DENO_x pro kotel K 9 v teplárně TAMEH Ostrava s.r.o.
2. Význam minimalizace přebytku vzduchu pro spalování ve vztahu k tvorbě NO_x
3. Stanovení závislosti spalné teploty vybraných paliv a součinitele přebytku vzduchu
4. Hodnocení výsledků

Seznam doporučené odborné literatury:

1. HORBAJ, P. Ekologické aspekty spařování. Košice: TU, 1999. 71s., ISBN 80-7099-405-3.
2. STÁŇA, M. Výpočetní a diagnostické metody pro snižování emisí NO_x kotlů velkých výkonů. Autoreferát disertační práce. Ostrava: VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2008. 46s. ISBN 978-80-248-1725-5.
3. ČERNÝ a kol. Parní kotle a spalovací zařízení. Praha: SNTL, 1975. 526 s.
4. RÉDR, M., PŘÍHODA, M. Základy tepelné techniky. Praha: SNTL, 1991. 677s. ISBN 80-03-00366-0.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Zuzana Klečková, CSc.**

Konzultant diplomové práce: **Doc. Ing. Pavel Šonovský, CSc.**

Datum zadání: 30.11.2015

Datum odevzdání: 22.04.2016

doc. Ing. Jozef Vlček, Ph.D.
vedoucí katedry



prof. Ing. Jana Dobrovská, CSc.
děkanka fakulty

Zásady pro vypracování diplomové práce

I.

Diplomovou prací (dále jen DP) se ověřují vědomosti a dovednosti, které student získal během studia, a jeho schopnosti využívat je při řešení teoretických i praktických problémů.

II.

Uspořádání diplomové práce:

- | | |
|--|------------------------------|
| 1. Titulní list | 6. Obsah DP |
| 2. Originál zadání DP | 7. Textová část DP |
| 3. Zásady pro vypracování DP | 8. Seznam použité literatury |
| 4. Prohlášení + místopřísežné prohlášení | 9. Přílohy |
| 5. Abstrakt + klíčová slova česky a anglicky | |

ad 1) Titulní list je koncipován podle požadavků příslušné oborové katedry.

ad 2) Originál zadání DP student obdrží na své oborové katedře.

ad 3) Tyto „Zásady pro vypracování diplomové práce“ následují za originálem zadání DP. („Zásady pro vypracování diplomové práce“ jsou ke stažení na webových stránkách fakulty).

ad 4) Prohlášení + místopřísežné prohlášení napsané na zvláštním listu (ke stažení na webových stránkách fakulty) a vlastnoručně podepsané studentem s uvedením data odevzdání DP. V případě, že DP vychází ze spolupráce s jinými právníky a fyzickými osobami a obsahuje citlivé údaje, je na zvláštním listě vloženo prohlášení spolupracující právnické nebo fyzické osoby o souhlasu se zveřejněním DP.

ad 5) Abstrakt a klíčová slova jsou uvedena na zvláštním listu česky a anglicky v rozsahu max. 1 strany pro obě jazykové verze.

ad 6) Obsah DP se uvádí na zvláštním listu. Zahrnuje názvy všech očíslovaných kapitol, podkapitol a statí textové části DP, odkaz na seznam příloh a seznam použité literatury, s uvedením příslušné stránky. Předpokládá se desetinné číslování.

ad 7) Textová část DP obvykle zahrnuje:

- Úvod, obsahující charakteristiku řešeného problému a cíle jeho řešení v souladu se zadáním DP;
- Vlastní rozpracování DP (včetně obrázků, tabulek, výpočtů) s dílčími závěry, vhodně členěné do kapitol a podkapitol podle povahy problému;
- Závěr, obsahující celkové hodnocení výsledků DP z hlediska stanoveného zadání.

DP bude zpracována v rozsahu min. cca 45 stran (včetně obsahu a seznamu použité literatury). V případě, kdy zadání DP vychází ze spolupráce se subjekty mimo VŠB -TU Ostrava a řešení studenta, týkající se citlivých dat spolupracujícího subjektu, je zpracováno v samostatné zprávě, tak zveřejněná část DP bude zpracována v rozsahu min. 25 stran a celkový rozsah DP bude min. 45 stran.

Text musí být napsán vhodným textovým editorem počítače po jedné straně bílého nelesklého papíru formátu A4 při respektování následující doporučené úpravy - písmo Times New Roman 12b; řádkování 1,5; okraje – horní, dolní – 2,5 cm, levý – 3 cm, pravý 2 cm, zarovnání do bloku. Fotografie, schémata, obrázky, tabulky musí být očíslovány a musí na ně být v textu poukázáno.

Budou zařazeny průběžně v textu, pouze je-li to nezbytně nutné, jako přílohy (viz ad 9). Odborná terminologie práce musí odpovídat platným normám. Všechny výpočty musí být přehledně uspořádány tak, aby každý odborník byl schopen přezkoušet jejich správnost. Matematické vzorce musí být číslovány (v kulatých závorkách). U vzorců, údajů a hodnot převzatých z odborné literatury nebo z praxe musí být uveden jejich pramen - u literatury citován číselným odkazem (v hranatých závorkách) na seznam použité literatury. Nedostatky ve způsobu vyjadřování, nedostatky gramatické, neopravené chyby v textu mohou snížit klasifikaci práce.

ad 8) DP bude obsahovat alespoň 15 literárních odkazů, z toho nejméně 5 v některém ze světových jazyků.

Seznam použité literatury se píše na zvláštním listě. **Citaci literatury je nutno uvádět důsledně v souladu s ČSN ISO 690.** Na práce uvedené v seznamu použité literatury musí být uveden odkaz v textu DP.

ad 9) Přílohy budou obsahovat jen ty části (speciální výpočty, zdrojové texty programů aj.), které nelze vhodně včlenit do vlastní textové části např. z důvodu ztráty srozumitelnosti.

III.

Diplomovou práci student odevzdá ve dvou knihařsky svázaných vyhotoveních, pokud katedra garantující studijní obor neurčí jiný počet. Vnější desky budou označeny takto:

nahoře: *Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava*
Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství
Katedra

uprostřed: *DIPLOMOVÁ PRÁCE*

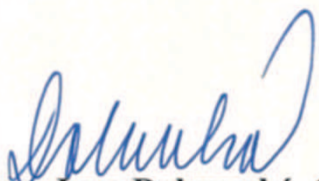
dole: *Rok* *Jméno a příjmení*

Kromě těchto dvou knihařsky svázaných výtisků odevzdá student kompletní DP také v elektronické formě do IS EDISON. Práce vložená v elektronické formě do IS EDISON se musí zcela shodovat s prací odevzdanou v tištěné formě. Po vložení DP do IS EDISON bude provedena její kontrola na plagiátorství.

IV.

Nesplnění výše uvedených zásad pro vypracování diplomové práce může být důvodem nepřijetí práce k obhajobě. O nepřijetí práce k obhajobě rozhoduje v tomto případě garant příslušného studijního oboru. Tyto zásady jsou závazné pro studenty všech studijních programů a forem navazujícího magisterského studia Fakulty metalurgie a materiálového inženýrství Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava od akademického roku 2015/2016.

Ostrava 2. 11. 2015


Prof. Ing. Jana Dobrovská, CSc.
děkanka Fakulty metalurgie a materiálového inženýrství
VŠB-TU Ostrava

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- jsem byl(a) seznámen(a) s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. - autorský zákon, zejména §35 - užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního (§60 - školní dílo);
- беру на vědomí, že Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB - TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§35 odst. 3);
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude archivována v elektronické formě v databázi Ústřední knihovny VŠB - TUO a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO;
- bylo sjednáno, že s VŠB - TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona;
- bylo sjednáno, že užít své dílo - diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB - TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB - TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- беру на vědomí, že odevzdáním své diplomové práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (Zákon o vysokých školách) bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Místopřísežně prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci vypracoval(a) samostatně.

V Ostravě 22.4.2016

.....
podpis (jméno a příjmení studenta)

PODĚKOVÁNÍ

Diplomová práce vznikla za podpory grantových projektů SP2016/110 – Tepelné procesy a materiálová náročnost v průmyslové výrobě a SP2016/103 – Specifický výzkum v metalurgickém, materiálovém a procesním inženýrství.

Dále bych rád poděkoval vedoucí této diplomové práce doc. Ing. Zuzaně Klečkové, CSc. za její obětavý přístup, cenné rady a připomínky, strávený čas a metodické vedení.

ABSTRAKT

Tato práce je věnována vlivu průběhu spalování vzduchu na spalnou teplotu vybraných paliv v přímé vazbě na tvorbu NO_x v teplárně TAMEH Ostrava s.r.o. Vybranými palivy jsou vysokopecní plyn, koksárenský plyn, uhlí a směs uhlí a vysokopecního plynu. Jsou popsány faktory a metody, které omezují tvorbu NO_x v procesu spalování. Výpočty jsou provedeny v oblasti smíšeného a dokonalého spalování. Je provedena analýza proměnlivého množství spalovacího vzduchu na tvorbu a objem vzniklých spalin. Ve výpočtech je zohledněn vliv chemického nedopalu.

KLÍČOVÁ SLOVA

spalovací procesy, kotel, spalná teplota, součinitel přebytku vzduchu, emise oxidů dusíku, primární a sekundární opatření

ABSTRACT

This work is dedicated to determining the influence of excess air to the combustion temperature of fuels at the heating plant TAMEH Ostrava s.r.o. Selected fuels are blast furnace gas, coke-oven gas and coal and a mixture of coal and blast furnace gas. There are described factors and methods that reduce the formation of NO_x in the combustion process. Calculations are performed in the mixed and complete combustion. Analysis is made with varying amounts of combustion air for the formation and the volume of created flue gas. In the calculations, there is also the impact of chemical unburned.

KEYWORDS

combustion processes, boiler, combustion temperature, excess air, emissions of nitrogen oxides, the primary and secondary measures

SEZNAM POUŽITÝCH VELIČIN

Značka	Veličina	Jednotka
i_{pl}	entalpie plynu	$(J \cdot m^{-3}), (J \cdot kg^{-1})$
i_{sp}	entalpie spalin	$(J \cdot m^{-3}), (J \cdot kg^{-1})$
$i_{sp,max}$	maximální entalpie spalin	$(J \cdot m^{-3}), (J \cdot kg^{-1})$
$i_{sp,min}$	minimální entalpie spalin	$(J \cdot m^{-3}), (J \cdot kg^{-1})$
L_{max}	maximální množství spalovacího vzduchu	$(m^3 \cdot m^{-3}), (m^3 \cdot kg^{-1})$
L_{min}	minimální množství spalovacího vzduchu	$(m^3 \cdot m^{-3}), (m^3 \cdot kg^{-1})$
L_{skut}	skutečné množství spalovacího vzduchu	$(m^3 \cdot m^{-3}), (m^3 \cdot kg^{-1})$
n	součinitel přebytku vzduchu	(1)
$P_{nas,30}$	parciální tlak vodní páry pro 30 °C	(kPa)
$P_{nas,15}$	parciální tlak vodní páry pro 15 °C	(kPa)
P_c	celkový tlak plynu	(kPa)
P_k	kritický tlak	(kPa)
Q_i	výhřevnost paliva	$(J \cdot m^{-3}), (J \cdot kg^{-1})$
$Q_{i,M}$	výhřevnost vlhkého paliva	$(J \cdot m^{-3}), (J \cdot kg^{-1})$
Q_{pl}	předehřátí paliva	$(J \cdot m^{-3}), (J \cdot kg^{-1})$
Q_{vz}	předehřátí spalovacího vzduchu	$(J \cdot m^{-3}), (J \cdot kg^{-1})$
O_{min}	minimální množství kyslíku	$(m^3 \cdot m^{-3}), (m^3 \cdot kg^{-1})$
T	termodynamická teplota	(K)
t_a	adiabatická spalná teplota	(°C)
t_{max}	maximální teplota	(°C)
t_{pl}	teplota plynu	(°C)
t_t	teoretická spalná teplota	(°C)
t_{vz}	teplota spalovacího vzduchu	(°C)
t_p	praktická spalná teplota	(°C)
V_c	celkový objem plynu	(m^3)
V_{CO}	objem oxidu uhelnatého ve spalinách	$(m^3 \cdot m^{-3}), (m^3 \cdot kg^{-1})$
V_{CO2}	objem oxidu uhličitého ve spalinách	$(m^3 \cdot m^{-3}), (m^3 \cdot kg^{-1})$
V_{H2O}	objem vody ve spalinách	$(m^3 \cdot m^{-3}), (m^3 \cdot kg^{-1})$
V_{O2}	objem kyslíku ve spalinách	$(m^3 \cdot m^{-3}), (m^3 \cdot kg^{-1})$
V_{N2}	objem dusíku ve spalinách	$(m^3 \cdot m^{-3}), (m^3 \cdot kg^{-1})$

V_{SO_2}	objem oxidu siřičitého ve spalinách	$(\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}), (\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1})$
ρ_{NO}	objemová hmotnost	$(\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1})$
τ	doba trvání reakce	(s)
φ	nasycení vodní páry	(%)
φ_i	objemový podíl jednotlivých složek v plynu	(%)
η_{pyr}	pyrometrický efekt	(1)
w_C	hmotnostní podíl uhlíku	(%)
w_H	hmotnostní podíl vodíku	(%)
w_S	hmotnostní podíl síry	(%)
w_W	hmotnostní podíl vody	(%)

OBSAH

SEZNAM POUŽITÝCH VELIČIN	8
1. ÚVOD.....	12
2. CHARAKTERISTIKY OXIDŮ DUSÍKU	13
2.1 POPIS OXIDU DUSNATÉHO, DUSITÉHO A DUSIČITÉHO	13
2.2 VLIV OXIDŮ DUSÍKU NA ŽIVOTNÍ PROSTŘEDÍ	14
3. ZPŮSOBY VZNIKU NO _x VE SPALOVACÍCH PROCESECH	16
3.1 PALIVOVÉ NO _x	16
3.2 TERMICKÉ NO _x	17
3.3 PROMTNÍ NO _x	18
4. SNIŽOVÁNÍ EMISÍ OXIDŮ DUSÍKU	19
4.1 PRIMÁRNÍ OPATŘENÍ.....	19
4.2 SEKUNDÁRNÍ OPATŘENÍ.....	19
5. METODY OMEZOVÁNÍ TVORBY NO _x PŘI SPALOVÁNÍ PLYNU A UHLÍ.....	21
5.1 SNÍŽENÍ PŘEBYTKU VZDUCHU	21
5.2 SNÍŽENÁ TEPLoty VZDUCHU	22
5.3 RECIRKULACE SPALIN.....	22
5.4 SPALOVÁNÍ S POSTUPNÝM PŘÍVODEM VZDUCHU	22
5.5 KONSTRUKCE HOŘÁKŮ	23
5.6 REGULACE SEKUNDÁRNÍM PALIVEM.....	24
6. OPATŘENÍ DENO _x PRO KOTEL K9 V TEPLÁRNĚ TAMEH OSTRAVA	25
6.1 PRIMÁRNÍ OPATŘENÍ ZA ÚČELEM SNÍŽENÍ NO _x U KOTLE K9.....	25
6.2 SEKUNDÁRNÍ OPATŘENÍ ZA ÚČELEM SNÍŽENÍ NO _x U KOTLE K9.....	26
7. CHARAKTERISTIKA VYBRANÝCH PALIV	29
7.1 VYSOKOPECNÍ PLYN (VP).....	29
7.2 KOKSÁRENSKÝ PLYN (KP)	30
7.3 UHLÍ.....	32
8. VÝPOČET SPALNÝCH TEPLot.....	34
8.1 VYSOKOPECNÍ PLYN	34
8.1.1 Výpočet adiabatické spalné teploty pro dokonalé spalování.....	36
8.1.2 Výpočet teoretické spalné teploty pro dokonalé spalování	39
8.1.3 Výpočet praktické spalné teploty pro dokonalé spalování	42
8.1.4 Výpočet teoretické spalné teploty pro smíšené spalování	42
8.1.5 Výpočet praktické spalné teploty pro smíšené spalování	45
8.2 KOKSÁRENSKÝ PLYN	45
8.2.1 Výpočet adiabatické spalné teploty pro dokonalé spalování.....	47
8.2.2 Výpočet teoretické spalné teploty pro dokonalé spalování	48
8.2.3 Výpočet praktické spalné teploty pro dokonalé spalování	50

8.2.4	<i>Výpočet teoretické spalné teploty pro smíšené spalování</i>	51
8.2.5	<i>Výpočet praktické spalné teploty pro smíšené spalování</i>	54
8.3	UHLÍ	54
8.3.1	<i>Výpočet adiabatické spalné teploty pro dokonalé spalování</i>	55
8.3.2	<i>Výpočet teoretické spalné teploty pro dokonalé spalování</i>	57
8.3.3	<i>Výpočet praktické spalné teploty pro dokonalé spalování</i>	58
8.3.4	<i>Výpočet teoretické spalné teploty pro smíšené spalování</i>	58
8.3.5	<i>Výpočet praktické spalné teploty pro smíšené spalování</i>	62
8.4	VÝPOČET SPALOVÁNÍ SMĚSI UHLÍ A VYSOKOPECNÍHO PLYNU	62
8.4.1	<i>Výpočet teoretické spalné teploty směsi pro dokonalé spalování</i>	63
8.4.2	<i>Výpočet praktické spalné teploty pro smíšené spalování</i>	63
8.4.3	<i>Výpočet teoretické spalné teploty směsi pro nedokonalé spalování</i>	64
8.4.4	<i>Výpočet praktické spalné teploty pro smíšené spalování</i>	64
9.	VYHODNOCENÍ VÝPOČTŮ	65
9.1	VYSOKOPECNÍ PLYN	66
9.2	KOKSÁRENSKÝ PLYN	68
9.3	UHLÍ	70
9.4	ZHODNOCENÍ VYBRANÝCH PALIV	72
10.	ZÁVĚR	76
	POUŽITÁ LITERATURA	77
	SEZNAM OBRÁZKŮ	79
	SEZNAM TABULEK	80

1. ÚVOD

V současné době je globálně kladen stále větší a větší důraz na ochranu životního prostředí. Skleníkový efekt, z něho plynoucí globální oteplování, kyselé deště a nežádoucí jevy v atmosféře (smog) vznikají především v důsledku lidské činnosti, přičemž jedním z hlavních zdrojů znečišťujících látek v ovzduší jsou veškeré spalovací procesy, při kterých vznikají především emise SO_x , NO_x , CO_2 , CO a TZL.

Tyto chemické látky jsou při vyšší koncentraci v ovzduší zdraví škodlivé a mají negativní vliv na okolní flóru i faunu. K tomu, aby se minimalizovaly tyto negativní dopady na životní prostředí, slouží zákonem stanovené specifické emisní limity, které příslušné maximální množství vypouštěných látek regulují.

Specifické emisní limity se udávají v jednotkách $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ a jejich celková hodnota závisí na celkovém příkonu energetického zdroje. Pro kotel K9 v teplárně TAMEH Czech s.r.o., u kterého se realizuje opatření DENO_x , jsou podle vyhlášky č. 415/2012 Sb. Vyhláška o přípustné úrovni znečišťování a o provedení některých dalších ustanovení zákona o ochraně ovzduší, stanoveny pro spalovací stacionární zdroje o příkonu $> 100 - 300 \text{ MW}$ tyto hodnoty specifických emisních limitů NO_x : u pevných paliv $200 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$, u koksárenského plynu $200 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ a u vysokopecního plynu $200 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$, přičemž hodnota pro koksárenský a vysokopecní plyn může být u zdrojů uvedených do provozu před 27. listopadem 2002 zmírněna až na $300 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$.

Množství přebytku vzduchu, který se přidává do spalovací komory, má na výslednou spalovací teplotu paliv rozhodující vliv. Hodnota přidávaného spalovacího vzduchu ovlivňuje spalnou teplotu paliva a tím i tvorbu emisí NO_x .

Je proto snaha upravit spalovací proces tak, aby se snížila tvorba NO_x , a upřednostnit primární opatření před sekundárním opatřením denitrifikace.

Diplomová práce se z výše uvedených důvodů zabývá vlivem průběhu spalování jak v oblasti dokonalého, tak i smíšeného spalování, na výslednou spalnou teplotu v provozu teplárny TAMEH Czech s.r.o. při použití uhlí, vysokopecního a koksárenského plynu, případně směsi uhlí s přídavkem vysokopecního plynu.

2. CHARAKTERISTIKY OXIDŮ DUSÍKU

Oxidy dusíku jsou nedílnou součástí životního prostředí. Nejčastěji vznikají při spalování fosilních paliv za vysokých teplot. Mezi nejčastěji vyskytované oxidy dusíku patří:

- Oxid dusnatý NO
- Oxid dusný N₂O
- Oxid dusičitý NO₂

Oxidy dusíků jsou účastníky vzniku přízemního ozónu a kyselých dešťů. Oxid dusnatý je biogenní plyn a patří mezi významné skleníkové plyny. Nejčastěji je člověk vystavován oxidům dusíku při vdechování, to se projevuje při nižších koncentracích podrážděním sliznic horních cest dýchacích a očí. Vyšší dávky mohou způsobit popálení dýchací soustavy, křeče, nevolnost nebo snížení okysličení organismu. V některých případech může nastat i smrt. Při styku s kůží dochází k vážným popáleninám.

2.1 Popis oxidu dusnatého, dusitého a dusičitého

OXID DUSNATÝ

Oxid dusnatý NO je bezbarvý a velmi jedovatý plyn. Je to jednoduchá molekula, která se skládá z atomu kyslíku a atomu dusíku. Vyskytuje se v atmosférickém vzduchu a je ve vnějším prostředí oxidován na NO₂. Ve vnitřním prostředí je oxidace oxidu dusnatého na oxid dusičitý bez přítomnosti ozónu a UV záření. Tato oxidace je velmi pomalá, a proto jsou emise uvnitř budov považovány za nevýznamné [1].

Vlastnosti NO [2], [3]:

- | | | |
|---------------------------------|---------|---------------------|
| • Molární hmotnost M_{NO} | 30,01 | g·mol ⁻¹ |
| • Objemová hmotnost ρ_{NO} | 1,34 | kg·m ⁻³ |
| • Teplota tání | 109,60 | K |
| • Teplota varu | 121,40 | K |
| • Kritická teplota T_k | 180,0 | K |
| • Kritický tlak p_k | 6 485,0 | kPa |

OXID DUSNÝ

Oxid dusný N₂O neboli také „rajský plyn“ je bezbarvý plyn nasládlé chuti. Vzniká při spalování za nízkých teplot a je nedílnou součástí skleníkového efektu. Tento plyn zabraňuje přestupu tepelného záření o větších vlnových délkách zpět do prostoru vesmíru. Vdechování oxidu dusného nejprve způsobuje euforii, ve vyšších dávkách může člověku přivodit anestetický spánek. Dlouhodobé užívání může způsobit těžké dýchací problémy a následně i smrt. Tvorbu emisí N₂O nejvíce podporují fluidní kotle [1].

Vlastnosti N₂O [2], [3]:

• Molární hmotnost M_{NO}	44,01	g·mol ⁻¹
• Objemová hmotnost ρ_{NO}	1,98	kg·m ⁻³
• Teplota tání	170,75	K
• Teplota varu	184,67	K
• Kritická teplota T_k	309,58	K
• Kritický tlak p_k	7 255,0	kPa

OXID DUSIČITÝ

Oxid dusičitý NO₂ je červenohnědý plyn, který lze za určitých podmínek zachytit při smogových situacích. Působení NO₂ s koncentrací 0,5 ~ 1,5 ppm po dobu jedné hodiny způsobuje dýchací potíže. Spolupůsobení oxidu dusičitého společně se slunečním zářením a uhlovodíky vytváří ozón a polyacetalnitrát (PAN). Tyto složky nepříznivě působí na oči a vegetaci. Z těchto důvodů jsou emise NO_x limitovány [4].

NO₂ je schopen se dimenzovat na N₂O₄. Při reakci s vodou vzniká kyselina dusitá a dusičná [4].



Vlastnosti NO₂ [2], [3]:

• Molární hmotnost M_{NO}	46,01	g·mol ⁻¹
• Objemová hmotnost ρ_{NO}	2,053	kg·m ⁻³
• Teplota tání	261,95	K
• Teplota varu	294,35	K
• Kritická teplota T_k	430,95	K
• Kritický tlak p_k	10 100	kPa

2.2 Vliv oxidů dusíku na životní prostředí

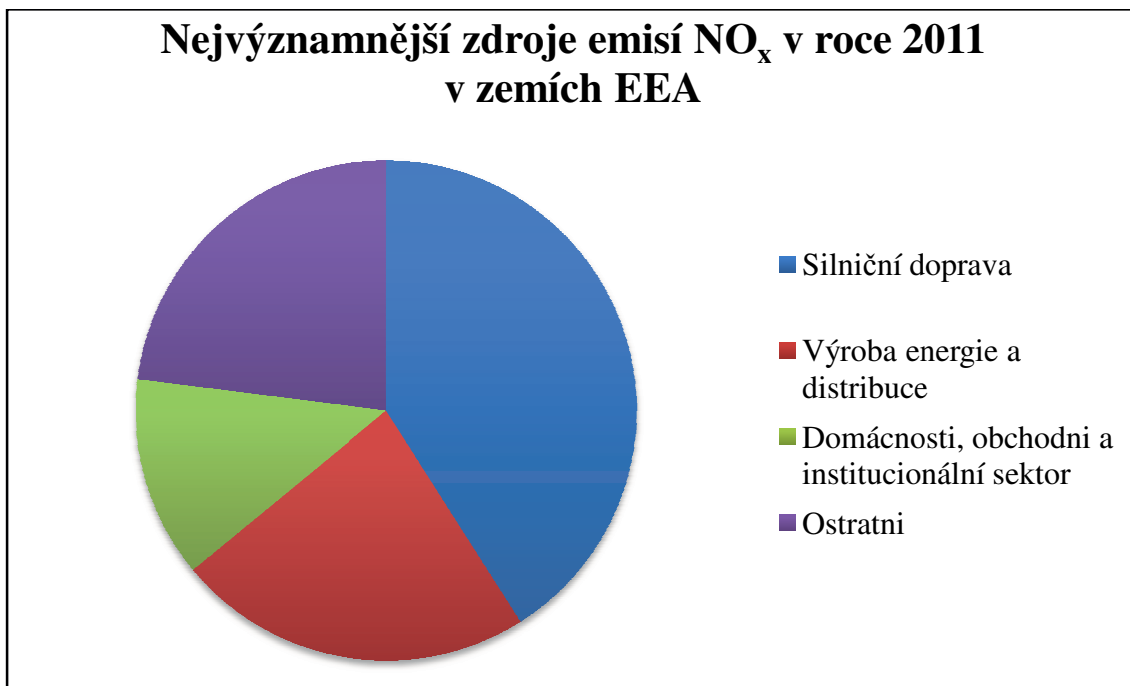
Dusík je biogenní prvek, a proto je v přiměřeném množství potřebný pro růst rostlin. V praxi se běžně používá jako přísada do hnojících prostředků. Působení NO a NO₂, ve vyšších koncentracích, má na rostliny nepříznivý vliv. Vegetace ztrácí imunitu a jsou náchylnější k plísniím či mrazu [5].

Oxid dusičitý NO₂ a oxidy síry jsou součástí kyselých dešťů, které okyselují vodní toky a mají negativní vliv na životní prostředí. V dnešní době množství dusíku, které z atmosféry proniká k zemskému povrchu není zanedbatelné. Dusičnanové ionty, které jsou přítomny v zeminách a vodách, mají příznivý vliv na zmíněný růst rostlin, ale ve větším množství mohou způsobit úhyn ryb a nárůstu vodních rostlin [5].

Působením NO₂ s dalšími složkami, jako jsou kyslík a těkavé organické látky, vzniká přízemní ozón, který při velkých koncentracích negativně působí na živé rostliny a zemědělské plodiny [5].

Další sloučenina, která podporuje skleníkové plyny, je oxid dusnatý NO. Hromadí se v atmosféře a s ostatními skleníkovými plyny pohlcuje infračervené záření odražené od zemského povrchu. Toto záření, které neunikne ze Země do vesmírného prostoru, přispívá ke vzniku skleníkového efektu, se kterým je úzce spjata globální oteplování naší planety [5].

Podle Evropské agentury pro životní prostředí EEA, jsou za největší producenty NO_x v ovzduší považovány činnosti uvedené na obrázku 1 (údaje jsou brány za rok 2011) [6].



Obr. 1 Zdroje emisí NO_x v roce 2011 v zemích EEA [6]

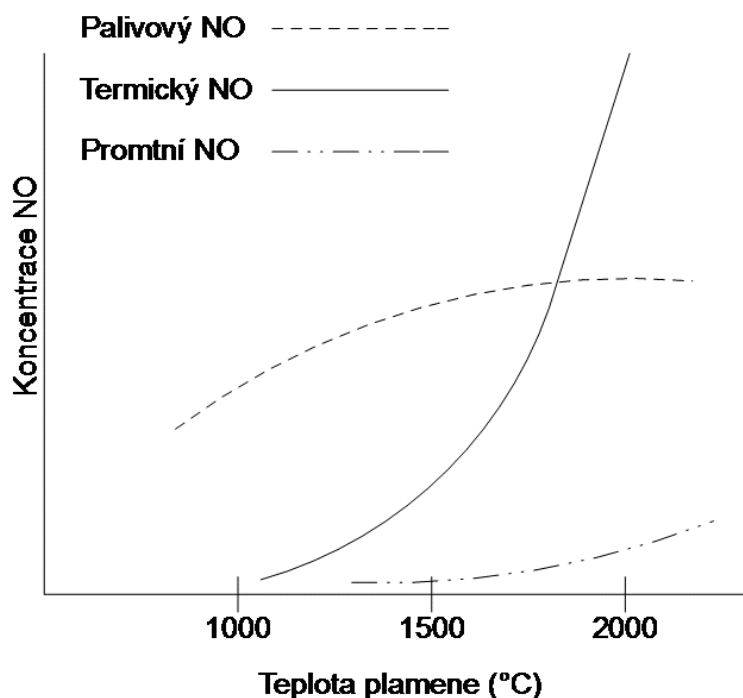
3. ZPŮSOBY VZNIKU NO_x VE SPALOVACÍCH PROCESECH

Zdrojem NO_x ve spalinách fosilních paliv jsou dusíkaté látky přítomné v hořlavině paliva nebo dusík ze spalovacího vzduchu. Oxidy dusíku NO_x jsou složeny z 95% NO (oxidu dusnatého) a 5 % NO_2 (oxidu dusičitého) [7].

Podle mechanismu vzniku se oxidy dusíku dělí na:

- palivové,
- termické,
- promptní – rychlé.

Grafické znázornění tvorby oxidů dusíku (palivový, termický, promptní) v závislosti na teplotě je schématicky uvedeno na obrázku 2.



Obr. 2 Závislost tvorby NO na teplotě [7]

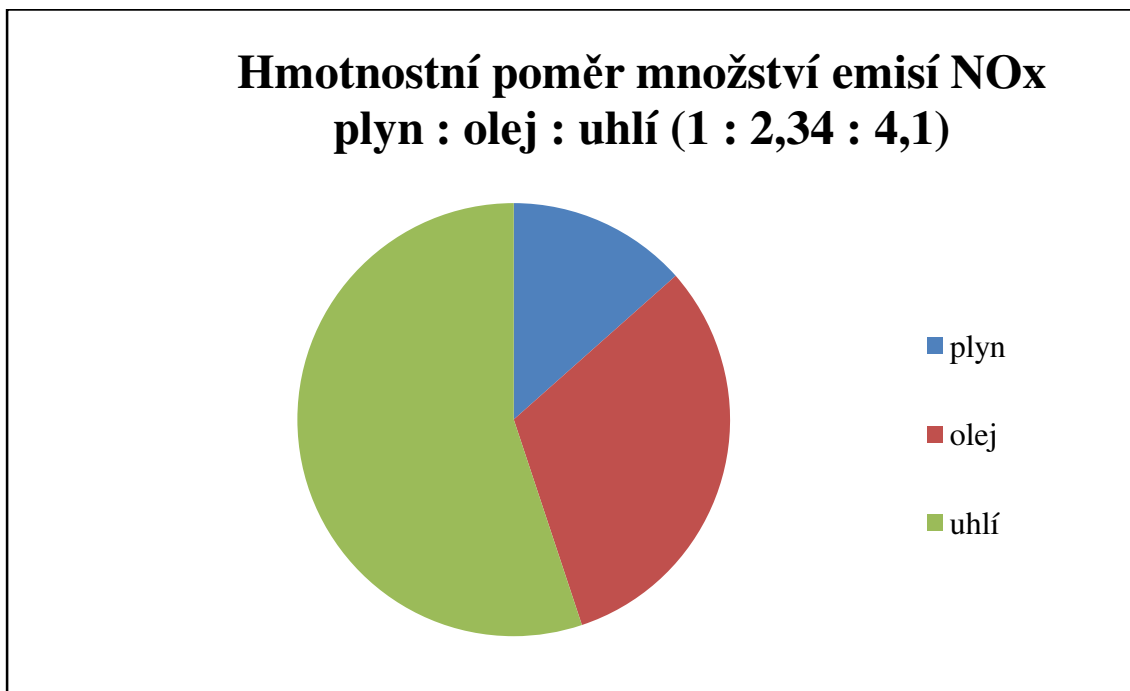
3.1 Palivové NO_x

Palivový NO_x je tvořen dusíkem obsaženým v palivu. Množství dusíku v pevných palivech, topných olejích a plynech vytváří příznivé podmínky pro jeho tvorbu.

Obsah dusíku je v pevných palivech v rozmezí 0,2 ~ 2 %, v topných olejích 0,1 ~ 0,6 % a v plynech [8]:

- vysokopecní plyn – 70 %,
- degazační plyn – 50 %,
- směsný plyn – 40 %,
- koksárenský plyn – 7 %.

Jestliže proces spalování nedosahuje požadovaných vysokých teplot hoření a potřebné doby setrvání v těchto teplotách, potom palivový NO vzniká jen omezeně. Při spalování uhlí byly koncentrace NO_x nejvyšší a naopak nejnižší hodnoty se projevily při spalování plynů. Hmotnostní poměr množství emisí NO_x vztažené na tepelný výkon lze vyjádřit dle obrázku 3 [8]:



Obr. 3 Hmotnostní poměr množství emisí [8]

Tento hmotnostní poměr vyplývá z rozdílných spalovacích teplot, chemické vazby dusíku k palivu a také z přebytku vzduchu a spalovacích podmínek.

Minerální látky, které jsou obsaženy v palivu, komplikují tvorbu NO_x. U těchto látek se projevuje inhibiční nebo katalytický účinek. U plynů se může projevit při kontaktu s keramickým povrchem ve spalovací komoře [8].

3.2 Termické NO_x

Termický NO_x vzniká při vysokých spalovacích teplotách (nad 1100 °C) reakcí atmosférického dusíku s kyslíkem.

$$C_{NO} = K_1 \cdot \exp\left(\frac{-K_2}{T}\right) \cdot C_{N_2} \cdot C_{O_2}^{0,5} \cdot \tau \quad (\text{mol}) \quad (2)$$

C_{NO} , C_{N_2} a C_{O_2} je látkové množství (mol)

K_1 - konstanta 1 ($\text{s}^{-1} \cdot \text{mol}^{-0,5}$)

K_2 - Konstanta 2 ($\text{s}^{-1} \cdot \text{mol}^{-0,5}$)

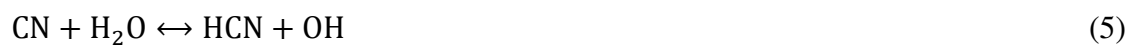
T - je termodynamická teplota (K)

τ - jedoba trvání reakce (s)

Z této rovnice (2) vyplývá, že vysoké teploty, koncentrace kyslíku a doba trvání reakce ovlivňují tvorbu termického NO. Tato forma NO převládá u paliv s nízkým obsahem dusíku [8].

3.3 Promptní NO_x

Promptní neboli rychlý NO_x je tvořen současně s palivovým NO_x. Je to proces krátkodobý, který má malou závislost na teplotě, ale velkou závislost na přebytku vzduchu. Reakci lze popsat rovnicemi [8]:



Promptní NO vzniká v zanedbatelném množství až při teplotě nad 2000 °C. Radikály jsou produkty těchto reakcí a snižují tvorbu NO_x [3].

Tvorba rychlého NO_x má nejmenší význam. Je to vlastně pouze speciální případ palivového NO_x [8].

4. SNIŽOVÁNÍ EMISÍ OXIDŮ DUSÍKU

V dnešní době jsou pro snižování emisí oxidů dusíků používány 2 druhy opatření. Jsou to opatření primární a sekundární.

4.1 Primární opatření

Primární opatření minimalizují nebo zamezují vznik škodlivin. Spočívají v úpravě spalování paliva v kotli. Tato primární opatření se tedy aplikují před opatřeními sekundárními. Technologie spalování je nastavena takovým způsobem, aby vznikalo co nejmenší množství škodlivin, případně aby se redukovaly vzniklé NO_x .

Výčet primárních opatření ke snížení tvorby NO_x [9]:

- Spalování s nízkým přebytkem vzduchu,
- Snížení predehřátí spalovacího vzduchu,
- Postupný přívod vzduchu – třístupňový přívod vzduchu,
- Postupný přívod vzduchu – dvoustupňové spalování,
- Analogie dvoustupňového spalování na celý spalovací prostor,
- Dvoustupňový přívod paliva – třístupňové spalování,
- Recirkulace spalin,
- Hořák s recirkulací spalin a stupňovitým přívodem vzduchu.

4.2 Sekundární opatření

Tato zmíněná opatření spočívají v čištění spalin chemickým a nebo fyzikálně chemickým procesem. Tímto způsobem se dosahují velmi nízké hodnoty obsahu NO_x . Procesy se dělí na mokré a suché. Mezi nejčastěji využívané suché metody můžeme zařadit selektivní katalytickou redukci SCR a selektivní nekatalytickou redukci SNCR. Jednou z možností je i výstavba denitrifikačních zařízení, která je však značně nákladná.

Selektivní katalytická redukce CSR (Selective Catalytic reduction)

Tato technologie je jednou z nejvíce nákladově efektivních. SCR může redukovat výši NO_x až o 90 %. Jedná se o metodu s použitím katalyzátorů při nižších teplotách 170 – 510 °C [10], [24].

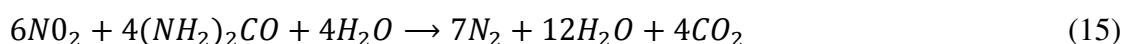
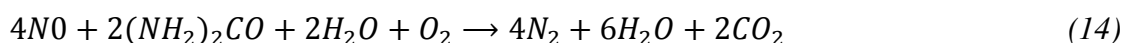
Tato technologie je vytvořena na základě, kdy oxidy dusíku se díky přidávanému čpavku nebo močoviny za přítomnosti kyslíku mění v neškodný dusík a páru [10].

Redukce NO_x za pomoci amoniaku (NH_3) [11]:





Redukce NO_x za pomoci močoviny ((NH₂)₂CO) [24]:



Selektivní nekatalytická redukce SNCR (Selective Non-Catalytic reduction)

Tato metoda je tvořena na základě principu vytvoření takových redukčních podmínek, při kterých dochází ke vstříkovaní čpavku nebo močoviny do spalovacího procesu, které selektivně snižují NO_x za vzniku elementárního dusíku a páry. Proces spalování probíhá při teplotách v rozmezí 850 až 1100 °C bez použití katalyzátoru. Teplotní rozmezí je závislé na použitém reakčním činidle (čpavek, močovina a nebo hydroxid amonný). Během této metody dochází k účinnosti snížení NO_x o 30 až 50 % [12][24]:

Při nižší teplotě jsou níže uvedené reakce velmi pomalé, při vyšší teplotě převažuje nežádoucí vedlejší reakce a zvýší se emise NO_x [24]:

Redukce NO_x za pomoci amoniaku (NH₃):



Je zde možnost výskytu nežádoucích reakcí (oxidace):



Reakce NO_x se čpavkem/močovinou na vodu a dusík je velmi závislá na teplotě a době prodlevy v potřebném teplotním rozmezí a také na poměru čpavku a NO_x. Teplotní rozmezí při použití čpavku a hydroxidu amonného je 850 – 1000 °C při optimální teplotě 870 °C. Teplotní rozmezí za přítomnosti močoviny se pohybuje mezi 800 – 1100 °C s optimální teplotou 1000 °C. Doba prodlevy je 0,2 – 0,5 sekundy a optimální poměr NH₃ : NO_x je stanoven v rozmezí 1,5 až 2,5 [24].

5. METODY OMEZOVÁNÍ TVORBY NO_x PŘI SPALOVÁNÍ PLYNU A UHLÍ

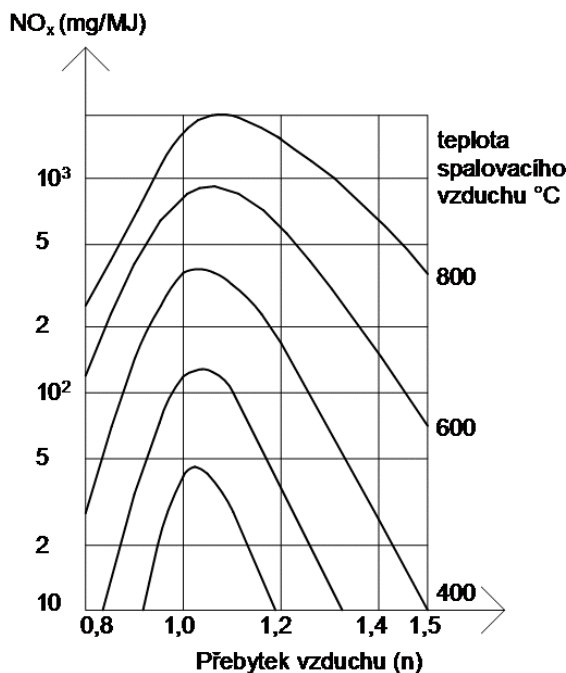
Tvorba emisí NO_x závisí na několika parametrech, které se dají vhodným způsobem ovlivňovat a následně minimalizovat vznikající oxidy dusíku. Mezi nejdůležitější faktory, které ovlivňují tvorbu NO_x patří:

- přebytek vzduchu,
- předehřev vzduchu,
- druh paliva,
- aerodynamika plamene,
- recirkulace spalin.

Tyto veličiny mají velký vliv na teoretickou a praktickou spalovací teplotu a na délku plamene.

5.1 Snížení přebytku vzduchu

Snížování přebytku vzduchu je v práškových ohništích primární opatření pro snížení NO_x . Přebytek vzduchu ovlivňuje nejen praktickou spalovací teplotu, ale také koncentraci O_2 v nejvyšších teplotách. Jestliže se sníží přebytek vzduchu, tak dojde ke snížení koncentrace kyslíku v plameni a tím se omezí tvorba palivového a termického NO_x . K řešení tohoto problému není potřeba žádné rekonstrukce. Za určitých podmínek může dojít i ke zvýšení výkonnosti kotle. Optimálním řešením je snížení podílu velkých prachových částic. V blízkosti hořáku je rychlejší zapálení prášku a hoření je stabilnější. Je to díky snížení koncentrace kyslíku. V konečných fázích, kdy dohořívají největší částice, se projevuje snížený přebytek vzduchu negativně. Přenos tepla a hmoty obecně klesá s rostoucím rozměrem [8]. Závislost přebytku vzduchu na tvorbě NO_x je zobrazena na obrázku 4.



Obr. 4 Závislost NO_x na přebytku vzduchu při dané teplotě [13]

Optimální hodnoty přebytku vzduchu[14]:

- u roštových ohnišť 1,25 ~ 1,50,
- u práškových granulačních ohnišť 1,20,
- u práškových výtavných ohnišť 1,15,
- u fluidních ohnišť 1,25 ~ 1,40,
- u ohnišť na plynná paliva 1,05 ~ 1,15,
- u ohnišť na kapalná paliva 1,25 ~ 1,41.

5.2 Snížená teploty vzduchu

Předehřev spalovacího vzduchu sice zvyšuje spalovací teplotu, ale také zlepšuje podmínky pro tvorbu emisí NO_x . K docílení snížení NO_x se snižuje spalovací teplota. To má ovšem za následek snížení účinnosti a tepelného výkonu kotle. Řešení musí vycházet z konkrétních procesů za účelem snížení emisí NO_x [8].

5.3 Recirkulace spalin

Metoda recirkulace spalin je založena na zpětném přívodu spalin do spalovací komory. Je to velice jednoduchá a levná metoda, která se dělí na vnitřní a vnější recirkulaci spalin. Vnitřní metoda je založena na částečném vrácení spalin (přes hořáky) zpět do spalovacího prostoru. Naopak ve vnější recirkulaci spalin se část spalin vrací do prostoru nad hořáky. Touto recirkulací se docílí rychlejšího ohřevu směsi vzduchu s palivem a zároveň rychlejšího zapálení a zmenšení koncentrace kyslíku v této směsi paliva a vzduchu. Následkem těchto faktorů se prodlužuje fronta hoření. Pro eliminaci termického NO_x je zapotřebí snížit teplotní maxima. Recirkulace spalin lze dosáhnout například konstrukcí hořáků [8].

5.4 Spalování s postupným přívodem vzduchu

Metoda spočívá v regulaci množství kyslíku v prostoru ohniště. Je to zdokonalená metoda snížení přebytku vzduchu. Prostor pro spalování je rozdělen na dvě až tři zóny. Každá zóna má jiný přebytek vzduchu pro spalování [8].

V primární zóně hoření probíhá při nedostatku kyslíku. Obsažený dusík v palivu se přemění na prchavou složku, ve které převládá NH_3 a HCN . Množství kyslíku je omezeno z důvodu jeho okysličení na NO_x [8].

Dokonalé vyhoření paliva se zajišťuje v sekundární, popřípadě v terciální zóně, přívodem spalovacího vzduchu. Hoření probíhá při nízkých teplotách. V primární zóně probíhá v redukčním prostředí, které tvorbu oxidů dusíku omezuje. Velký přebytek vzduchu způsobí oxidaci HCN a NH_3 . V primární zóně pod stechiometrickým spalováním je tvorba palivového NO_x snižována. Snižuje se také tvorba termického NO_x , protože teploty plamene dosahují nižších hodnot. Snížení přebytku vzduchu zvyšuje teplotu plamene. Nejčastějším řešením, jak eliminovat negativní dopady s potlačenou tvorbou NO_x , je právě postupný přívod spalovacího vzduchu. Ovšem negativní vlastnosti jsou provozní parametry ohniště a požadavky na vybavení [8].

Jeden z požadavků se týká mletí uhelného prášku. Jeho zvýšená jemnost zvyšuje jeho měrný povrch. To znamená, že se zvýší rychlost zapalování prášku. Závislost tvorby NO_x na parametrech prášku vzniká především při spalování černého uhlí [8].

Aby bylo zajištěno rovnoměrné tepelné zajištění stěn ohniště, volí se zásobování hořáků z jednoho mlýna. Nejnižší a nejvyšší patro hořáků má potom rozdílné podmínky pro vyhoření prášku. V nejnižším patře má prášek delší dobu hoření, proto zůstává déle ve vysokých teplotách a to má za následek nižší nedopal. V nejvyšším patře má prášek nejhorší podmínky a to se samozřejmě také podepisuje na úrovni nedopalu [8].

5.5 Konstrukce hořáků

Spalovací proces je aerodynamický proces, který závisí na výkonu, funkci, počtu hořáků a jejich umístění. Každý hořák je rozhodující součástí spalovacího zařízení a jeho úkolem je [7]:

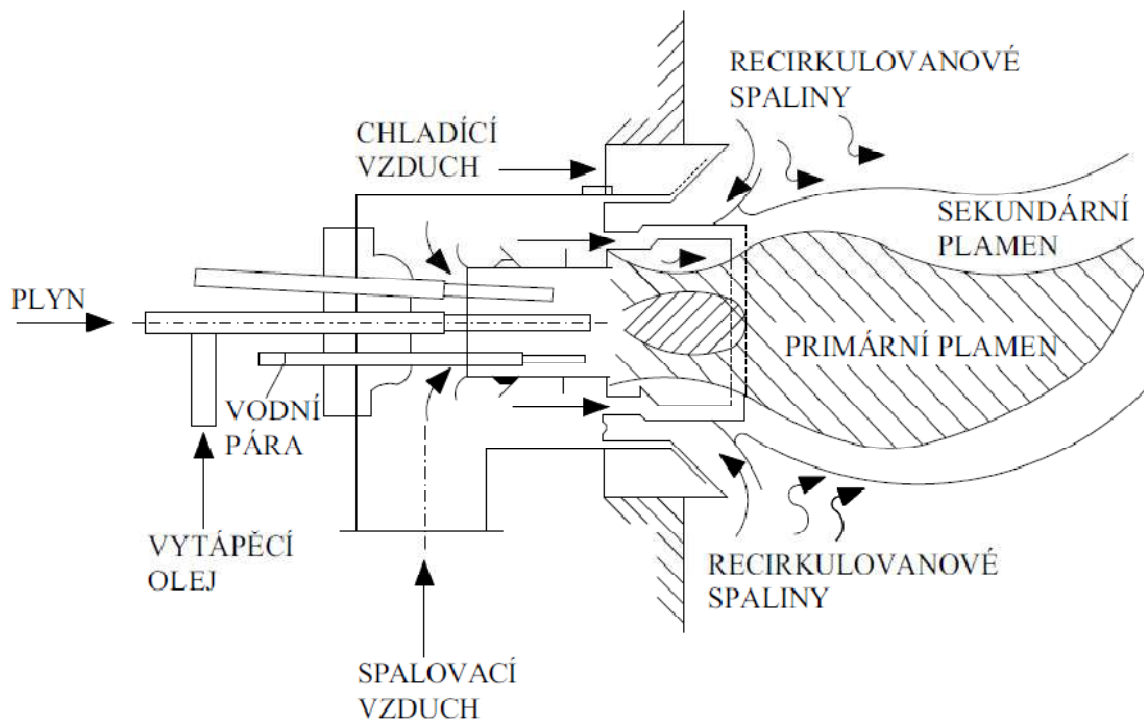
- Připravit homogenní směs paliva se vzduchem,
- Zajistit dokonalé vyhoření paliva při optimálním přebytku vzduchu,
- Nasměrování hořáků tak, aby plamen vyplnil spalovací prostor a nenarážel na stěny konstrukce,
- Odolávat sálavému tepelnému toku plamene.

Hořáky omezují tvorbu emisí oxidů dusíku. Při jejich návrhu se vychází z praktických a teoretických parametrů omezování tvorby NO_x . Nejpoužívanějším způsobem je využití postupného přívodu paliva a v neposlední řadě recirkulace spalin. Mezi základní požadavky pro optimalizaci spalování a minimalizování NO_x [8]:

- Minimalizovat ztráty nedopalem,
- Stabilizace hoření paliva,
- Snížení emisí,
- Jednoduchá údržba.

Pro zajištění stabilního hoření je konstrukce hořáků navržena jako vířivá. Řízený přívod spalovacího vzduchu je založen na rozdělení vzduchu do několika zón. Nejčastěji do dvou až tří zón. Množství přiváděného vzduchu je regulovatelné. Přiváděné teoretické množství vzduchu do první zóny je 30 až 40 %. Dochází zde k uvolnění prchavých látek. Do sekundární (druhé) popřípadě terciální (třetí) zóny je přiváděn vzduch v takovém množství, aby byly zajištěny optimální podmínky redukce vázaných složek N_2 a bylo zajištěno dokonalé vyhoření paliva. Pro dosažení minimálních hodnot tvorby NO_x je také důležitá regulace množství vzduchu v závislosti na příkonu paliva. Z praxe je známo, že spalovací poměr v primární zóně má rozhodující vliv na tvorbu NO_x [8].

Nízkoemisní směšovací hořák je uveden v obrázku 5.



Obr. 5 Nízkoemisní směšovací hořák fy Babcock [7].

5.6 Regulace sekundárním palivem

Hlavní podstatou této metody je záměna potřebné části spalovacího paliva palivem, které je spalováno pod hodnotou stechiometrického množství spalovacího vzduchu. Malá část paliva je přiváděna nad spalovací zónu, kde se spaluje práškové uhlí, vytváří sekundární zónu s redukčními vlastnostmi. Za zónou se přivádí spalovací vzduch potřebný pro dokonalé vyhoření paliva [8].

Při regulaci sekundárním palivem se může proces spalování popsat jako dodatečné spalování v následujících dvou zónách [8]:

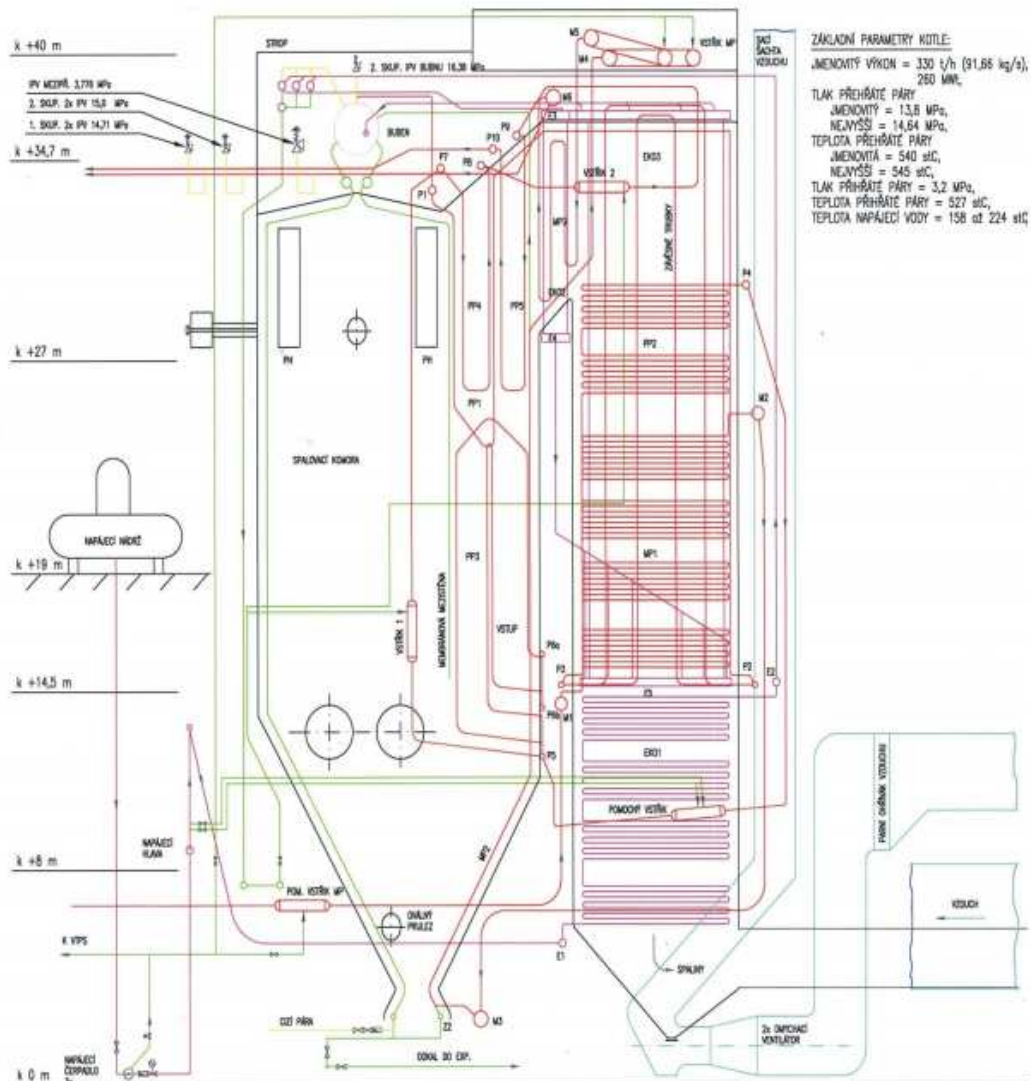
- Zóna redukce NO – v této zóně redukce je vzniklé NO redukováno uhlíkovými radikály.
- Konečná zóna (oxidační) – dostatečné vyhoření paliva zajistí přivedený vzduch. HCN, CO, NH₃ a dusík se většinou v nedopalu přemění na N₂ nebo zůstane jako NO.

Metoda regulace sekundárním palivem je vhodná pro nové stavby elektráren. U rekonstrukcí je to obtížné z ekonomického hlediska. Při rekonstrukci stávajících jednotek se překládají tepelné bilance v částech spalovací komory.

6. OPATŘENÍ DENO_x PRO KOTEL K9 V TEPLÁRNĚ TAMEH OSTRAVA

V současné době kotel K9 nesplňuje požadované emisní limity NO_x. Proto je pro budoucí provoz nezbytné zahájit rekonstrukci tohoto zařízení. Rekonstrukce bude zaměřena na instalaci nových nízkoemisních hořáků [15].

Řez granulačním kotlem je uveden na Obr. 6.



Obr. 6 Granulační kotel [26]

6.1 Primární opatření za účelem snížení NO_x u kotle K9

Surové uhlí, které je uloženo v oddělených zásobnících, padá ocelovými svodkami po otevření uzávěrů do talířových podavačů a dále do společné svodky, ve které se palivo mísí a pak dopravuje volným pádem do mlýna, kde se mele a suší. Horké spaliny, které jsou přiváděny do mlecího okruhu potrubím z prostoru kotle, slouží k sušení a dopravě semletého prášku [15].

Tímto je rozemleté palivo přiváděno do třídiče, ve kterém jsou hrubší frakce odloučeny a vráceny zpět do mlýna k dalšímu semletí. Nastavení regulačních klapek v třídiči a množství dopravního média, které prochází třídičem, pak ovlivňuje jemnost prášku, ten je potom z třídiče unášen do dvou cyklonů. V cyklonech je většina prášku odloučena od dopravovaného média. Do zásobníku prášku je prášek přiveden přes turniketový podavač. Do práškových hořáků je potom prášek dopravován společně se vzduchem z primárních ventilátorů přes podavače uhelného prášku do 12 směšovacích kusů (difuzorů) a 12 práškovodů [15].

Zásobníky surového uhlí a proplásku

Sanace a repasování zásobníků surového uhlí [15]:

- a) Revize vnitřního vyložení zásobníků surového uhlí,
 - Výměna odstávajících desek, poškozených koutů a rekonstrukce překryvové lišty.
- b) Sanace stavební části železobetonové konstrukce,
- c) Výměna ocelových svodek nad hradítky,

Talířové podavače surového uhlí

Podavače slouží k přepravě surového uhlí do mlýna. Hlavní části jsou: dopravní talíř, skříň, pohon a regulační ústrojí.

- a) Výroba dvou kusů nových talířových podavačů,
- b) Rekonstrukce převodových skříní podavačů [15].

Mlýn

Rekonstrukce mlýnu bude provedena v tomto rozsahu: výměna olejové nádrže mlýnu, výměna pancéřování mlýnu, výměna pancéřování výstupního a vstupního kolena, výměna šnekovnice, kontrola, namazání a vyčištění BIBI spojky, výměna vstupního ložiska mlýnu, kontrola pastorkových ložisek [15].

Další části kotle K9, které se zúčastní rozsáhlé rekonstrukce pro snížení emisí oxidů dusíku jsou: třídič, pravý a levý cyklón, zásobník uhelného prášku, mlýnský ventilátor, potrubí mlýnského okruhu, práškové a brýdové hořáky, modernizace protivýbuchového opatření a nátěrový systém [15].

6.2 Sekundární opatření za účelem snížení NO_x u kotle K9

K docílení snížení NO_x bude využito vzájemných reakcí NH₄OH s oxidy dusíku NO_x. Jedná se o tzv. selektivně nekatalytickou redukci. Bude probíhat v rozmezí teplot 870 ~ 1050 °C a lze popsat jednoduchou chemickou rovnicí [15].



V rozmezí již zmíněných teplot dosahuje selektivně nekatalytická redukce nejvyšší účinnosti. Z toho důvodu se do kotle bude vstříkovat požadované množství čpavkové vody. Vstřík čpavkové vody bude do spalovací komory navržen ve třech výškových úrovních. Nad

první výškovou úrovní bude situován měřič teploty spalin AGAM, který bude snímat plošný teplotní diagram ve spalovací komoře. Podle teplotního diagramu se bude systém starat o řízení jednotlivých výškových úrovní vstřikování. Podle aktuálního výkonu kotle a množství emisí NO_x ve spalinách určí systém objem vstřikované čpavkové vody. Do spalovací komory bude čpavková voda vstřikována pomocí trysek společně se stlačeným vzduchem. Ten má za úkol zajistit požadovaný rozstřík směsi po celém průřezu [15].

Mísící centrum (měřicí a míchací modul)

Mezi kotli K9 a K10 bude postaven na podlaží ve výšce +23,30 m míchací a měřicí modul (MMM). Do míchacího a měřicího modulu bude přivedena čpavková voda, stlačený vzduch a demineralizovaná voda ze zásobní nádrže. Ještě před mísícím centrem bude provedeno měření průtokové demineralizované vody [15].

Strojní část mísícího centra

Míchací a měřicí centrum měří průtok všech médií, v tomto případě čpavkové vody a stlačeného vzduchu. Měření je situováno na přívodním potrubí před mísícím centrem slouží k měření průtoku demineralizované vody. V míchacím a měřícím centru se nachází signální čidlo průtoku, dále redukční ventily tlakového vzduchu a demineralizované vody, regulační ventil čpavkové vody s pneumatickým pohonem, pneumaticky ovládané ventily pro přepínání toku média pro první až třetí úroveň vstřiku čpavkové vody do spalovací komory. Jsou zde také ventily ovládané ručně, manometry a další komponenty. Všechny komponenty mísícího centra budou v rámci rekonstrukce kotle K9 namontovány na rámové konstrukci. [15].

Vstřikovací trysky

Do spalovací komory kotle K9 budou namontovány 3 vstřikovací patra + 2 rezervní [15]:

- 1. vstřikovací patro je umístěno v úrovni 22,3 m a obsahuje 10 kusů vstřikovacích trysek,
- 2. vstřikovací patro je ve výškové úrovni 24,5 m se 14ti kusy vstřikovacích trysek,
- 3. vstřikovací patro, které je v nejvyšší výškové úrovni spalovací komory (26,0 m), má 8 kusů trysek,
- Dvě rezervní vstřikovací trysky v úrovních 18,8 m (6 ks trysek) a 20,3 m (4 ks trysek).

Měření teplotních polí AGAM

Teplotní pole AGAM slouží k měření teplotního pole ve spalovacím zařízení. Měřicí přístroj je založen na principu rychlosti šíření zvuku v odlišných teplotách. AGAM je složeno ze dvou částí: vysílací a přijímací [15].

Čpavkový skluz

Největší problémem je, že metoda SNCR má malý teplotní rozsah použití (870 ~ 1050 °C). Jestliže je čpavková voda vstřikována do oblastí nízkých teplot, tak oxidy dusíku nereagují s radikálem NH₃, protože je nízká reakční rychlost. Následně se zvýší koncentrace čpavku a jiných amonných sloučenin ve spalinách. Tomuto procesu se říká tzv. čpavkový skluz [15].

V opačném případě, kdy se čpavková voda vstřikuje do oblastí s vysokou teplotou, se zvyšuje koncentrace NO_x ve spalinách, protože NH_3 začne první reagovat s kyslíkem [15].

7. CHARAKTERISTIKA VYBRANÝCH PALIV

Diplomová práce je zaměřena na stanovení závislosti spalné teploty vlivem přebytku vzduchu vybraných paliv. Jedná se o paliva:

- Vysokopecní plyn (VP),
- Koksárenský plyn (KP),
- Uhlí.

7.1 Vysokopecní plyn (VP)

Vysokopecní plyn vzniká jako druhotné palivo ve vysoké peci při výrobě surového železa. Výhřevnost tohoto plynu se pohybuje v rozmezí $3,2 \sim 4,6 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-3}$ a jeho výtěžnost je $1600 \sim 2000 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ surového železa. Používá se jako základní složka směsného plynu. Nejčastěji se mísí s koksárenským plynem, případně zemním plynem nebo propan – butanem [4].

Procentuální zastoupení spotřeby vysokopecního plynu v metalurgických provozech [16]:

- provoz vysokých pecí	25 ~ 30 %,
- provoz koksoven	20 ~ 30 %,
- provoz válcoven	15 ~ 25 %,
- ostatní hutní výroba	15 ~ 15 %,
- provoz tepláren a elektráren	10 ~ 15 %,
- ztráty VP především při odvodu	do 13 %.

Ztráty vysokopecního plynu jsou v českých podmínkách podstatně vyšší než v zahraničí [16].

Teplota vysokopecního plynu

Teplota surového vysokopecního plynu se liší podle [17]:

- vybavení vysoké pece,
- vlhkosti a druhu vsázky,
- intenzity tavby,
- druhu surového železa,
- měrné spotřeby koksu atd.

Nejnižší teplotu má plyn s velkou vlhkostí, ovšem bereme-li se v úvahu stejný výkon vysoké pece a stejnou výšku šachty. Naopak nejvyšší teplotu má vysokopecní plyn tehdy, když se zpracovávají speciální železa a feroslitiny. Teplota surového plynu na výstupu ze sazební je 125 až 500 °C. Tuto teplotu, při stejném výkonu pece a stejném vybavení, zvyšují [6],[17]:

1. Vyšší podíl pražené rudy ve vsázce,
2. Vyšší podíl aglomerátu ve vsázce,
3. Zvýšení měrné spotřeby koksu.

Vlhkost vysokopecního plynu

Vlhkost vysokopecního plynu pochází z redukčních reakcí, při kterých se vzniklý vodík rozkladem vlhkosti větru sloučí s kyslíkem rudy za vzniku vody. Dále vlhkost pochází z hydrátové, hygroskopické nebo konstituční vody vsázky [17].

Při výpočtu vodních par v surovém plynu se přihlíží pouze k vodě, která je obsažena ve vsázce a předpokládá se, že kompletně přejde do plynu. Je nutné zmínit také vodní páru, která se vytvoří sloučením vodíku a kyslíku rudy během redukčního pochodu [6].

Prach ve vysokopecním plynu

Surový vysokopecní plyn, který opouští sazebnu, s sebou nese množství tuhých látek. Tyto látky pocházejí z rudy, vápence a koksu. Tuhé částice v surovém vysokopecním plynu jsou nazývány vysokopecí prach. Vysokopecním prachem mohou být i zkondenzované páry solí, oxidů alkalických kovů, hořčíku, zinku, křemíku apod [17].

Rozměry částic jsou různé. Pohybují se od jednoho mikrometru po kusy, které mohou dosahovat několika milimetrů [17].

Množství prachových částic je také různé. Průměrně se pohybuje od $30 \text{ g} \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$ do $\text{g} \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$. Množství prachu ovlivňuje [17]:

- fyzikální vlastnosti vsázky,
- vybavení vysoké pece,
- chod vysoké pece,
- intenzita tavby.

Čím je menší vlhkost složek vsázky a čím větší je obsah prachových podílů rudy, koksu a vápence, tím větší množství prachu přechází do plynu [17].

Čištění vysokopecního plynu

Prach v surovém vysokopecním plynu je ve velkém množství nežádoucí. Jestliže tento plyn obsahuje několik desítek gramů prachu v jednom metru krychlovém, tak je prakticky nepoužitelný, protože se rozvod potrubí zanedlouho ucpe usazeným prachem. Dále má prach v plynu za následek snížení funkcí měřících a regulačních systémů [17].

Z těchto důvodů je nutné VP plyn čistit. Čištěním se rozumí pouze odprašování, protože vysokopecní plyn nemá kromě prachu žádné jiné škodlivé složky, které by bylo třeba odstraňovat [16].

7.2 Koksárenský plyn (KP)

Surový koksárenský plyn má vyšší výhřevnost než vysokopecní plyn. Pohybuje se v rozmezí $15 \sim 16 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-3}$. Vysoká výhřevnost je způsobena přítomností vodíku, oxidu uhelnatého, metanu a uhlovodíků. Další složky, které koksárenský plyn obsahuje, jsou dehet, lehký olej, síra a čpavek. Složení koksárenského plynu je proměnlivé a závisí na době koksování a složení uhlí [18].

Koksování

Koksování je proces karbonizace, který začíná po navážce uhlím. Z uhlí odchází plyn o vlhkosti v rozmezí 8 ~ 11 %. Tento plyn (surový koksárenský plyn) se vyfukuje do hlavního sběrného vedení. Po dalších úpravách se díky vysoké výhřevnosti používá jako palivo [18].

Surový koksárenský plyn

Výtěžek surového koksárenského plynu je 12 ~ 25 m³ za hodinu na tunu uhlí. Hustota plynu je 0,53 ~ 0,62 kg.m⁻³

Tabulka 1. Složení surového koksárenského plynu [18].

Prvek	množství	Jednotka
Vodík	39,0 – 64,0	%
Methan	32,0 – 42,0	%
Uhlovodíky C _n H _m	3,0 – 8,5	%
Oxid uhelnatý	4,0 – 6,5	%
Oxid uhličitý	2,0 – 3,0	%
Sirovodík	3,0 – 4,0	%
Benzen, toluen, xyleny	23,0 – 30,0	g·m ⁻³
Polycyklické aromatické uhlovodíky	–	mg·m ⁻³
Čpavek	6,8 – 8,0	g·m ⁻³

Koksárenský plyn se řadí mezi důležité produkty koksoven. Jeho vlastnosti (výhřevnost, složení) se liší podle vlastností a druhu karbonizovaného uhlí, které se zpracovává v již zmíněné koksovně.

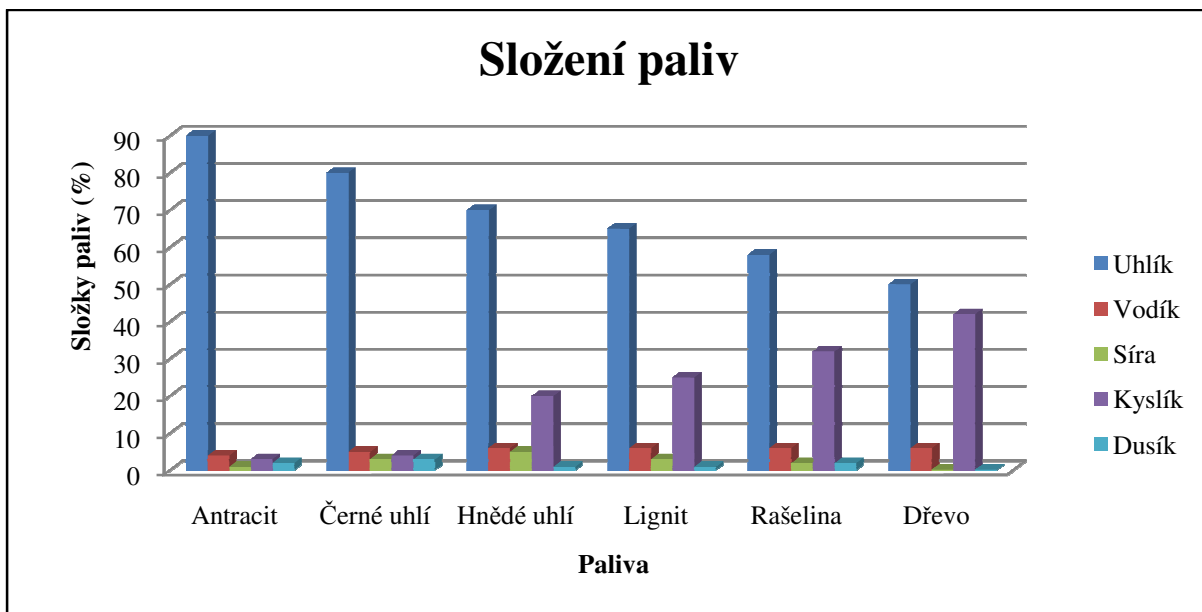
Tabulka 2. Složení chemicky upraveného koksárenského plynu [17].

Prvek	množství	Jednotka
Vodík	52,0 – 55,0	%
Methan	24,0 – 28,0	%
Uhlovodíky C _n H _m	2,0 – 3,5	%
Oxid uhelnatý	6,5 – 9,0	%
Kyslík	0,5 – 1,0	%
Oxid uhličitý	2,0 – 4,5	%
Dusík	5 – 10	g·N ⁻¹ ·m ⁻³
Síra celková	0,15 – 0,30	g·N ⁻¹ ·m ⁻³
Obsah naftalenu za benzolkou	0,15 – 0,30	g·N ⁻¹ ·m ⁻³
Obsah benzolu před benzolkou	20 – 40	g·N ⁻¹ ·m ⁻³
Obsah benzolu za benzolkou	1 – 2	g·N ⁻¹ ·m ⁻³
Měrná váha	5200 – 5800	g·N ⁻¹ ·m ⁻³
Výhřevnost	3900 – 4400	kcal·N ⁻¹ ·m ⁻³

Chemicky upravený koksárenský plyn (viz tab. 2) má, v porovnání se surovým koksárenským plynem (viz tab.1), jiné složení. Značné rozdíly vykazují zejména složky vodíku a methanu. To se samozřejmě projeví i ve výhřevnosti koksárenského plynu.

7.3 Uhlí

Uhlí je organická hmota, která se skládá z prvků uhlíku, vodíku, kyslíku, dusíku a síry. Uhlík, vodík a síra mají rozhodující vliv na proces spalování. Hořlavina se dělí na tuhý a prchavý podíl, to má rozhodující význam pro spalovací proces. Prchavá veličina ve velké míře ovlivňuje vzněcování paliva. Největší množství prchavé hořlaviny z uhlí se uvolňuje při teplotách 400 ~ 450 °C. Následně při teplotě 450 ~ 650 °C se zapaluje uhlík a uhlovodíky. Při zapálení těchto dvou složek roste teplota plamene.



Obr. 7 Procentuální složení vybraných tuhých paliv [19]

Z obr. 7 vyplývá, že s rostoucím geologickým stářím paliva se zvyšuje obsah uhlíku a naopak snižuje obsah kyslíku v palivu.

Vlastnosti uhlí

Mezi nejdůležitější vlastnosti uhlí patří:

- množství vody v surovém vzorku,
- obsah popeloviny v suchém vzorku,
- obsah popeloviny v surovém vzorku,
- výhřevnost,
- obsah síry,
- obsah prchavé hořlaviny [20].

U těchto vlastností se provádí analýza a následné vyhodnocení.

Prchavá hořlavina

Prchavá hořlavina udává množství látky v plynném stavu, které se, zahříváním za nepřístupu vzduchu, uvolní z hořlaviny paliva. Výhřevnost prchavé hořlaviny není konstantní, pohybuje se v rozmezí 20 ~ 56 MJ·kg⁻¹, zatímco u tuhého zbytku se výhřevnost nemění (33,9 ~ 56 MJ·kg⁻¹) [20].

Obsah prchavé hořlaviny se pohybuje u antracitu v rozsahu 5 až 10 %, u hnědých uhlí 45 až 60 %. V průběhu hoření je prchavá hořlavina nejvýznamnější veličinou, protože ovlivňuje průběh vzněcování paliva. Nejvyšší množství prchavých látek se uvolňuje už při teplotách 200 až 400 °C [21].

Obsah popelovin

Popel obsažený v palivu má negativní vliv na přístup kyslíku k hořlavině. Čím hrubší je mletí, tím je projev významnější. Částečky popela zhoršují přestup tepla, protože se usazují na teplosměnných plochách. Na výstupu z kotle proto stoupá teplota spalin. Vyšší obsah popelovin má za následek rostoucí hustotu spalin, dochází k ucpávání tahů a zvyšuje se odpor průtoku spalin [20], [21].

Obsah popelovin se pohybuje v rozmezí 15 až 25 % [21].

Výpočet výhřevnosti uhlí

Vztah pro výpočet výhřevnosti uhlí je dán následující rovnicí [20]:

$$Q_i = Q_i^h \cdot (1 - w - A) - 2\,453,5 \cdot w \quad (\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}) \quad (19)$$

kde Q_i^h je výhřevnost hořlaviny ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$)

w – obsah vody (%)

A – obsah popelovin (%)

Zrnitost uhlí

Zrnitost uhlí je jedna z nejdůležitějších vlastností pro přípravu paliva ke spalování a pro dopravu uhlí. Zrna větší než 30 mm nejsou vhodná pro spolehlivou dopravu. Nejvhodnější zrnění je 10 až 12 mm. Tento požadavek splňuje předdrcené těžené uhlí nebo vytříděný prach [20].

Menší částice, to znamená podíl frakce 0 až 5 mm, by neměly přesáhnout 6%.

8. VÝPOČET SPALNÝCH TEPLOT

Práce je založena na stanovení třech typů spalných teplot pro vybraná paliva (vysokopecní plyn, koksárenský plyn a uhlí). Podmínky výpočtu vybraných paliv:

- Adiabatická – určuje vlastnosti paliva, nepočítá s předeřhřevem spalovacích složek a součinitel přebytku vzduchu n se vždy rovná jedné.
- Teoretická – srovnávací teplota pro stejná nebo různá paliva za působení stejných nebo různých spalovacích procesů [23].
- Praktická – charakterizuje praktické spalovací podmínky (teoretická spalná teplota vynásobená pyrometrickým efektem η_{pyr}).

Výpočet je proveden pro následující podmínky:

- Vysokopecní plyn je 100 % vlhký, teplota předeřhřátí vzduchu je nastavena na 160 °C, teplota plynu je 30 °C. Součinitel přebytku vzduchu $n = 1,05$.
- Koksárenský plyn je 100 % vlhký, teplota předeřhřátí vzduchu je nastavena na 160 °C, teplota plynu je 15 °C. Součinitel přebytku vzduchu $n = 1,1$.
- Uhlí je počítáno s vlhkostí 1%, předeřhřátí vzduchu je opět 160 °C, teplota uhlí je 90 °C. Součinitel přebytku vzduchu $n = 1,0$.

Pyrometrický efekt, u všech tří paliv, má hodnotu $\eta_{pyr} = 0,75$.

Parciální tlak plynu P_{nas} pro teplotu 15 a 30 °C je odečten z tabulek [22].
 $P_{nas}^{30} = 4,241$ kPa, $P_{nas}^{15} = 1,704$ kPa.

Součinitel přebytku vzduchu n se pohybuje rozmezí 0,8 ~ 1,2. Výpočty by měly prokázat vliv jeho změny na hodnotu spalné teploty.

Podrobný výpočet těchto spalných teplot pro konkrétní paliva (vysokopecní plyn, koksárenský plyn a uhlí) je uveden v následujících podkapitolách.

8.1 Vysokopecní plyn

Obsahem této kapitoly je stanovení třech typů spalných teplot (adiabatická, teoretická a praktická) pro vysokopecní plyn.

Chemické složení a parametry vysokopecního plynu jsou uvedeny v tab. 3 a tab. 4.

Tabulka 3. Chemické složení vysokopecního plynu

Název prvku	Chemická značka	Množství	Jednotka
Oxid uhelnatý	CO	23,0	%
Vodík	H ₂	2,0	%
Oxid uhličitý	CO ₂	19,0	%
Dusík	N ₂	56,0	%
Celkem	Σ	100,0	%

Tabulka 4. Parametry vysokopecního plynu

Název	Značka	Hodnota	Jednotka
Teplota plynu	t_{pl}	30,0	°C
Teplota spalovacího vzduchu	t_{vz}	160,0	°C
Součinitel přebytku vzduchu	n	1,05	-
Pyrometrický efekt	η_{pyr}	0,75	-
Vlhkost plynu	-	100,0	%

Výpočet výhřevnosti vysokopecního plynu

Výhřevnost Q_i je množství tepla, které se uvolní dokonalým spálením měrné jednotky paliva, přičemž kondenzace vodní páry ve spalínách nenastane [22].

Stanovení celkové výhřevnosti suchého plynu se vypočte podle výhřevností jednotlivých složek, které jsou v tomto plynu obsaženy.

$$Q_i = \sum_{n=1}^n \varphi_i \cdot Q_i \quad (\text{J} \cdot \text{m}^{-3}) \quad (20)$$

$$Q_i = (Q_i^{CO} \cdot \varphi_{CO} + Q_i^{H_2} \cdot \varphi_{H_2}) \quad (\text{J} \cdot \text{m}^{-3})$$

$$Q_i = (12,64 \cdot 23 + 10,76 \cdot 2) = \mathbf{3,1224 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-3}}$$

kde Q_i^{CO} je výhřevnost oxidu uhelnatého ($\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3}$),

$Q_i^{H_2}$ – výhřevnost vodíku ($\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3}$),

φ_{CO} – objemový podíl oxidu uhelnatého (%),

φ_{H_2} – objemový podíl vodíku (%)

Přepočet složek suchého plynu na vlhký

Jelikož se nejedná o plyn suchý, nýbrž o plyn vlhký, tak je důležité přepočítat jednotlivá množství komponent vysokopecního plynu na vlhký stav.

$$V_{H_2O} = \frac{P_{nas}^{30} \cdot \varphi}{P_c} \cdot V_c \quad (\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}) \quad (21)$$

$$V_{H_2O} = \frac{4,241 \cdot 1}{101,325} \cdot 1 = \mathbf{0,0419 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}}$$

kde P_{nas}^{30} je parciální tlak vodní páry pro 30 °C (kPa),

φ – nasycení vodní páry (%),

P_c – celkový tlak plynu – součet atmosférického tlaku a přetlaku (kPa),

V_c – celkový objem plynu (m^3).

Vlivem obsahu vodní páry se změní složení mokrého plynu. Z důvodu vyskytující se plynné vlhkosti se změní procentuální zastoupení jednotlivých složek plynu.

Obecný vztah pro přepočet suchého plynu na vlhký:

$$\varphi_i^M = \varphi_i \cdot (1 - V_{H_2O}) \quad (\%) \quad (22)$$

kde φ_i^M je objemový podíl jednotlivých složek ve vlhkém plynu (%),

φ_i – objemový podíl jednotlivých složek v suchém plynu (%)

$$\varphi_{CO}^M = 23 \cdot (1 - 0,0419) = 22,0373 \%$$

$$\varphi_{CO_2}^M = 19 \cdot (1 - 0,0419) = 18,2047 \%$$

$$\varphi_{H_2}^M = 2 \cdot (1 - 0,0419) = 1,9163 \%$$

$$\varphi_{N_2}^M = 56 \cdot (1 - 0,0419) = 53,6561 \%$$

$$\varphi_{H_2O}^M = 0,0419 \cdot 100 = 4,1856 \%$$

V tabulce č.5 je uvedeno složení vlhkého vysokopecního plynu, které bude použito pro výpočet spalných teplot.

Tabulka 5. Chemické složení vlhkého vysokopecního plynu

φ_{CO}^M (%)	$\varphi_{CO_2}^M$ (%)	$\varphi_{H_2}^M$ (%)	$\varphi_{N_2}^M$ (%)	$\varphi_{H_2O}^M$ (%)	Σ (%)
22,0373	18,2047	1,9163	53,6561	4,1856	100,0

Výpočet výhřevnosti vlhkého plynu se stanoví podle rovnice:

$$Q_i^M = \sum_{n=1}^n \varphi_i \cdot Q_s - 19,6 \cdot (\varphi_{H_2}^M + \varphi_{H_2O}^M) \quad (J \cdot m^{-3}) \quad (23)$$

$$Q_i^M = 12,64 \cdot \frac{22,0373}{100} + 12,77 \cdot \frac{1,9163}{100} - 19,6 \cdot \left(\frac{1,9163}{100} + \frac{4,1856}{100} \right)$$

$$Q_i^M = \mathbf{2,9106 \text{ MJ} \cdot m^{-3}}$$

8.1.1 Výpočet adiabatické spalné teploty pro dokonalé spalování

Adiabatická spalná teplota t_a se stanovuje při adiabatických podmínkách. Stanovuje se pro podmínky dokonalého spalování při součiniteli přebytku vzduchu $n = 1$. U této teploty se nepočítá s přehřevem spalovacích složek.

Adiabatická spalná teplota je funkcí následujících veličin:

$$t_a = f(Q_{ch}, V_{sp}^{min}, c_{p,sp}) \quad (^\circ C) \quad (24)$$

Protože je adiabatická teplota funkcí objemu spalin, je nutné provést výpočet spalování.

Výpočet objemového spalování

Minimální množství kyslíku je dáno vztahem:

$$O_{min} = 0,5 \cdot \varphi_{CO}^M + 0,5 \cdot \varphi_{H_2}^M + 1,5 \cdot \varphi_{H_2S}^M + 2 \cdot \varphi_{CH_4}^M + 3,5 \cdot \varphi_{C_2H_6}^M + 5 \cdot \varphi_{C_3H_8}^M + 6,5 \cdot \varphi_{C_4H_{10}}^M + 3 \cdot \varphi_{C_2H_4}^M + 4,5 \cdot \varphi_{C_3H_6}^M + 3,8 \cdot \varphi_{C_nH_m}^M - \varphi_{O_2}^M \quad (\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}) \quad (25)$$

$$O_{min} = 0,5 \cdot \frac{22,0373}{100} + 0,5 \cdot \frac{1,9163}{100} = \mathbf{0,1198 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}}$$

Minimální množství spalovacího vzduchu:

$$L_{min} = O_{min} \cdot \frac{100}{21} \quad (\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}) \quad (26)$$

$$L_{min} = 0,1191 \cdot \frac{100}{21} = \mathbf{0,5701 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}}$$

Skutečné množství spalovacího vzduchu:

$$L_{skut} = L_{min} \cdot n \quad (\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}) \quad (27)$$

Součinitel přebytku vzduchu u adiabatické spalné teploty je roven 1.

$$L_{skut} = 0,5701 \cdot 1 = \mathbf{0,5701 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}}$$

Stanovení objemu oxidu uhličitého ve spalinách:

$$V_{CO_2} = \varphi_{CO}^M + \varphi_{CO_2}^M + \varphi_{CH_4}^M + 2 \cdot \varphi_{C_2H_6}^M + 3 \cdot \varphi_{C_3H_8}^M + 4 \cdot \varphi_{C_4H_{10}}^M + 2 \cdot \varphi_{C_2H_4}^M + 3 \cdot \varphi_{C_3H_6}^M + 2,6 \cdot \varphi_{C_nH_m}^M \quad (\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}) \quad (28)$$

$$V_{CO_2} = \frac{22,0373}{100} + \frac{18,2047}{100} = \mathbf{0,4024 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}}$$

Stanovení objemu vody ve spalinách:

$$V_{H_2O} = \varphi_{H_2}^M + 2 \cdot \varphi_{CH_4}^M + 3 \cdot \varphi_{C_2H_6}^M + 4 \cdot \varphi_{C_3H_8}^M + 5 \cdot \varphi_{C_4H_{10}}^M + 2 \cdot \varphi_{C_2H_4}^M + 3 \cdot \varphi_{C_3H_6}^M + 2,4 \cdot \varphi_{C_nH_m}^M + \varphi_{H_2O}^M \quad (\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}) \quad (29)$$

$$V_{H_2O} = \frac{1,9163}{100} + \frac{4,1856}{100} = \mathbf{0,0610 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}}$$

Objem dusíku ve spalinách:

$$V_{N_2} = \varphi_{N_2}^M + O_{min} \cdot \frac{79}{21} \cdot n \quad (\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}) \quad (30)$$

$$V_{N_2} = 0,5366 + 0,1198 \cdot \frac{79}{21} \cdot 1 = \mathbf{0,9871 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}}$$

U adiabatické teploty není přebytečný vzduchový kyslík:

$$V_{O_2} = O_{min} \cdot (n - 1) \quad (\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}) \quad (31)$$

$$V_{O_2} = 0,1198 \cdot (1 - 1) = \mathbf{0 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}}$$

Celkový objem spalin:

$$V_{SP} = V_{CO_2} + V_{H_2O} + V_{N_2} + O_2 \quad (\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}) \quad (32)$$

$$V_{SP} = 0,4024 + 0,0610 + 0,9871 = \mathbf{1,4506 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}}$$

Výsledky objemového spalování jsou uvedeny v tabulce č. 6.

Tabulka 6. Objemové spalování VP pro adiabatickou spalnou teplotu ($n = 1$)

Spalovací proces	Značka	Hodnota	Jednotka
Minimální množství kyslíku	O_{min}	0,1198	$\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$
Minimální množství spalovacího vzduchu	L_{min}	0,5701	$\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$
Skutečné množství spalovacího vzduchu	L_{skut}	0,5701	$\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$
Objem oxidu uhličitého ve spalinách	V_{CO_2}	0,4024	$\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$
Objem vody ve spalinách	V_{H_2O}	0,0610	$\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$
Objem dusíku ve spalinách	V_{N_2}	0,9871	$\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$
Objem kyslíku ve spalinách	V_{O_2}	0	$\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$
Celkový objem spalin	V_{SP}	1,4506	$\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$

Stanovení entalpie spalin

$$i_{sp} = \frac{Q_i^M + Q_{vz} + Q_{pl}}{V_{sp}} \quad (\text{J} \cdot \text{m}^{-3}) \quad (33)$$

Nepočítá se s předehřevem spalovacích složek, proto $Q_{vz} = Q_{pl} = 0$

$$i_{sp} = \frac{2910,6322 + 0 + 0}{1,4506} = \mathbf{2006,5630 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3}}$$

Pro vypočtenou hodnotu měrné entalpie i_{sp} byla určena nejbližší nižší hodnota i_{sp}^{min} , a nejbližší vyšší hodnota i_{sp}^{max} .

$$i_{sp}^{min} = 1967,67 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3} < i_{sp} = 2006,56 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3}$$

Odpovídající teplota t_{min} pro danou entalpii je rovna 1200 °C.

$$i_{sp}^{max} = 2068,70 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3} > i_{sp} = 2006,856 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3}$$

Odpovídající teplota t_{\max} pro danou entalpii je rovna 1250 °C.

Výpočet měrné entalpie při minimální teplotě:

$$i_{sp}^{min} = \frac{1}{V_{sp}} [V_{CO_2} \cdot i_{CO_2}^{min} + V_{H_2O} \cdot i_{H_2O}^{min} + V_{N_2} \cdot i_{N_2}^{min} + V_{O_2} \cdot i_{O_2}^{min} + V_{SO_2} \cdot i_{SO_2}^{min}] \quad (J \cdot m^{-3}) \quad (34)$$

$$i_{sp}^{min} = \frac{1}{1,4506} [0,4024 \cdot 2716,18 + 0,0610 \cdot 2126,98 + 0,9871 \cdot 1699,54 + 0 \cdot 1715,31] = \mathbf{1999,5619 \text{ kJ} \cdot m^{-3}}$$

Výpočet měrné entalpie při maximální teplotě:

$$i_{sp}^{max} = \frac{1}{V_{sp}} [V_{CO_2} \cdot i_{CO_2}^{max} + V_{H_2O} \cdot i_{H_2O}^{max} + V_{N_2} \cdot i_{N_2}^{max} + V_{O_2} \cdot i_{O_2}^{max} + V_{SO_2} \cdot i_{SO_2}^{max}] \quad (J \cdot m^{-3}) \quad (35)$$

$$i_{sp}^{max} = \frac{1}{1,4506} [0,4024 \cdot 2845,65 + 0,0610 \cdot 2231,59 + 0,9871 \cdot 1777,39 + 0 \cdot 1793,73]$$

$$i_{sp}^{max} = \mathbf{2092,8583 \text{ (kJ} \cdot m^{-3})}$$

$$i_{sp}^{min} = \mathbf{1999,61 \text{ kJ} \cdot m^{-3}} < i_{sp} = \mathbf{2006,88} < i_{sp}^{max} = \mathbf{2092,86 \text{ kJ} \cdot m^{-3}} \text{ (vyhovující)}$$

Hodnota měrné entalpie i_{sp} , se nachází v rozmezí minimální a maximální hodnoty měrné entalpie spalin. To znamená, že hodnoty minimální entalpie (i_{sp}^{min}) a maximální entalpie (i_{sp}^{max}) byly zvoleny správně. V případě, že by hodnota i_{sp} neležela v daném rozmezí, tak je nutné výpočet minimální a maximální měrné entalpie opakovat.

Adiabatická teplota je dána vztahem:

$$t = t_{min} + (i_{sp} - i_{sp}^{min}) \cdot \frac{t_{max} - t_{min}}{i_{sp}^{max} - i_{sp}^{min}} \quad (^\circ C) \quad (36)$$

$$t_a = 1200 + (2006,88 - 1999,61) \cdot \frac{1250 - 1200}{2092,91 - 1999,61}$$

$$t_a = \mathbf{1203,75 \text{ } ^\circ C}$$

8.1.2 Výpočet teoretické spalné teploty pro dokonalé spalování

Výhřevnost vlhkého plynu Q_i^{VL} je stejná jako u teploty adiabatické. Ovšem bude se měnit výpočet spalování, protože u teoretické teploty se počítá s hodnotou součinitele přebytku vzduchu $n > 1$ a s předeřtím spalovacích složek. Součinitel přebytku vzduchu pro vysokopeční plyn je stanoven $n = 1,05$, předeřtí plynu $t_{pl} = 30 \text{ } ^\circ C$, teplota předeřtí vzduchu $t_{vz} = 160 \text{ } ^\circ C$.

Výpočet objemového spalování pro vybranou hodnotu $n = 1,05$

Minimální množství kyslíku dle rovnice (25)

$$O_{min} = 0,5 \cdot \varphi_{CO}^M + 0,5 \cdot \varphi_{H_2}^M + 1,5 \cdot \varphi_{H_2S}^M + 2 \cdot \varphi_{CH_4}^M + 3,5 \cdot \varphi_{C_2H_6}^M + 5 \cdot \varphi_{C_3H_8}^M + 6,5 \cdot \varphi_{C_4H_{10}}^M + 3 \cdot \varphi_{C_2H_4}^M + 4,5 \cdot \varphi_{C_3H_6}^M + 3,8 \cdot \varphi_{C_nH_m}^M - \varphi_{O_2}^M$$

$$O_{min} = 0,5 \cdot \frac{22,0373}{100} + 0,5 \cdot \frac{1,9163}{100} = \mathbf{0,1198 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}}$$

Minimální množství spalovacího vzduchu dle rovnice (26)

$$L_{min} = O_{min} \cdot \frac{100}{21} = 0,1198 \cdot \frac{100}{21} = \mathbf{0,5701 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}}$$

Skutečné množství spalovacího vzduchu dle rovnice (27)

$$L_{skut} = L_{min} \cdot n = 0,5701 \cdot 1,05 = \mathbf{0,5989 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}}$$

Součinitel přebytku vzduchu je zadán $n = 1,05$

Objem oxidu uhličitého ve spalinách dle rovnice (28)

$$V_{CO_2} = \varphi_{CO}^M + \varphi_{CO_2}^M + \varphi_{CH_4}^M + 2 \cdot \varphi_{C_2H_6}^M + 3 \cdot \varphi_{C_3H_8}^M + 4 \cdot \varphi_{C_4H_{10}}^M + 2 \cdot \varphi_{C_2H_4}^M + 3 \cdot \varphi_{C_3H_6}^M + 2,6 \cdot \varphi_{C_nH_m}^M = \frac{22,04}{100} + \frac{18,2}{100} = \mathbf{0,4024 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}}$$

Objem vody ve spalinách dle rovnice (29)

$$V_{H_2O} = \varphi_{H_2}^M + 2 \cdot \varphi_{CH_4}^M + 3 \cdot \varphi_{C_2H_6}^M + 4 \cdot \varphi_{C_3H_8}^M + 5 \cdot \varphi_{C_4H_{10}}^M + 2 \cdot \varphi_{C_2H_4}^M + 3 \cdot \varphi_{C_3H_6}^M + 2,4 \cdot \varphi_{C_nH_m}^M + \varphi_{H_2S}^M = \frac{1,92}{100} + \frac{4,19}{100} = \mathbf{0,0610 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}}$$

Objem dusíku ve spalinách dle rovnice (30)

$$V_{N_2} = \varphi_{N_2}^M + O_{min} \cdot \frac{79}{21} \cdot n = 0,5366 + 0,1198 \cdot \frac{79}{21} \cdot 1,05 = \mathbf{1,0096 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}}$$

Objem kyslíku ve spalinách dle rovnice (31)

$$V_{O_2} = O_{min} \cdot (n - 1) = 0,1198 \cdot (1,05 - 1) = \mathbf{0,0059 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}}$$

Celkový objem spalin dle rovnice (32)

$$V_{SP} = V_{CO_2} + V_{H_2O} + V_{N_2} + V_{O_2} = 0,40 + 0,06 + 1,01 + 0,01 = \mathbf{1,4791 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}}$$

Výsledky objemového spalování vysokopecního plynu při přebytku vzduchu $n = 1,05$ je uveden tabulce 7.

Tabulka 7. Objemové spalování VP pro teoretickou spalnou teplotu ($n = 1,05$)

Spalovací proces	Značka	Hodnota	Jednotka
Minimální množství kyslíku	O_{\min}	0,1198	$\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$
Minimální množství spalovacího vzduchu	L_{\min}	0,5701	$\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$
Skutečné množství spalovacího vzduchu	L_{skut}	0,5989	$\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$
Objem oxidu uhličitého ve spalínách	V_{CO_2}	0,4024	$\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$
Objem vody ve spalínách	$V_{\text{H}_2\text{O}}$	0,0610	$\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$
Objem dusíku ve spalínách	V_{N_2}	1,0096	$\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$
Objem kyslíku ve spalínách	V_{O_2}	0,0059	$\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$
Celkový objem spalín	V_{SP}	1,4791	$\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$

Stanovení přehřátí plynu [22]

$$Q_{pl} = V_{pl} \cdot i_{pl} \quad (\text{J} \cdot \text{m}^{-3}) \quad (37)$$

$$i_{pl} = \sum_{i=1}^n \varphi_i \cdot i_i \quad (\text{J} \cdot \text{m}^{-3}) \quad (38)$$

$$i_{pl} = \varphi_{\text{CO}}^M \cdot i_{\text{CO}}^{pl} + \varphi_{\text{H}_2}^M \cdot i_{\text{H}_2}^{pl} + \varphi_{\text{CO}_2}^M \cdot i_{\text{CO}_2}^{pl} + \varphi_{\text{N}_2}^M \cdot i_{\text{N}_2}^{pl} + \varphi_{\text{H}_2\text{O}}^M \cdot i_{\text{H}_2\text{O}}^{pl}$$

$$i_{pl} = 0,2204 \cdot 38,88 + 0,1916 \cdot 38,66 + 0,1820 \cdot 49,57 + 0,5366 \cdot 38,83 + 0,0419 \cdot 44,79 = \mathbf{41,0352 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3}}$$

$$i_{pl} = Q_{pl}$$

Stanovení přehřátí vzduchu [22]

$$Q_{vz} = L_{\text{skut}} \cdot i_{vz}^{t_{vz}} \quad (\text{J} \cdot \text{m}^{-3}) \quad (39)$$

$$Q_{vz} = 0,5988 \cdot 213,29 = \mathbf{127,7291 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3}}$$

Stanovení entalpie spalín dle rovnice (33)

$$i_{sp} = \frac{Q_i^{VL} + Q_{vz} + Q_{pl}}{V_{sp}} = \frac{2910,6322 + 41,0352 + 127,7291}{1,4791} = \mathbf{2081,9783 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3}}$$

Pro takto stanovenou entalpii spalín vysokopecního plynu byla stejným postupem, jak je uveden v kapitole 8.1.1, vypočtena hodnota teoretické spalné teploty s respektováním konkrétního spožení spalín. Po provedeném výpočtu vychází její hodnota $t_t = \mathbf{1247,39 \text{ } ^\circ\text{C}}$.

8.1.3 Výpočet praktické spalné teploty pro dokonalé spalování

Praktická teplota je teoretická teplota vynásobena pyrometrickým efektem η_{pyr} . Pro tento výpočet by zadán $\eta_{pyr} = 0,75$.

$$t_p = t_t \cdot \eta_{pyr} \quad (^\circ\text{C}) \quad (40)$$

$$t_p = 1247,39 \cdot 0,75 = \mathbf{935,54 \text{ } ^\circ\text{C}}$$

Hodnoty všech tří vybraných spalných teplot vysokopecního plynu, pro daný přebytek vzduchu $n = 1,05$, jsou uvedeny v tabulce 8.

Tabulka 8. Porovnání spalných teplot vysokopecního plynu ($n = 1,05$)

Spalná teplota	Značka	Hodnota	Jednotka
Adiabatická	t_a	1203,75	$^\circ\text{C}$
Teoretická	t_t	1247,39	$^\circ\text{C}$
Praktická	t_p	935,54	$^\circ\text{C}$

8.1.4 Výpočet teoretické spalné teploty pro smíšené spalování

Při hodnotách součinitele přebytku vzduchu menší než 1 dojde k průběhu smíšeného spalování. Vlivem nedostatku spalovacího kyslíku neshoří dokonale veškerý oxid uhelnatý na oxid uhličitý a jeho adekvátní část přejde do spalin. Přítomnost oxidu uhelnatého ve spalinách je zároveň chemickým nedopalem, jehož hodnota může negativně ovlivnit výslednou spalnou teplotu. Proto je nutné určit množství nespáleného oxidu uhelnatého a ve výpočtu zohlednit poměr složení spalin a výhřevnosti v důsledku jeho výskytu.

Součinitel přebytku vzduchu pro vysokopecní plyn je stanoven $n = 0,9$, předehřátí plynu $t_{pl} = 30 \text{ } ^\circ\text{C}$, teplota předehřátí vzduchu $t_{vz} = 160 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Výpočet objemového spalování pro vybranou hodnotu $n = 0,9$

Výpočet minimálního množství kyslíku pro $n = 0,9$ dle rovnice (25)

$$O_{min}^{n=0,9} = 0,5 \cdot \varphi_{CO}^M + 0,5 \cdot \varphi_{H_2}^M + 1,5 \cdot \varphi_{H_2S}^M + 2 \cdot \varphi_{CH_4}^M + 3,5 \cdot \varphi_{C_2H_6}^M + 5 \cdot \varphi_{C_3H_8}^M + 6,5 \cdot \varphi_{C_4H_{10}}^M + 3 \cdot \varphi_{C_2H_4}^M + 4,5 \cdot \varphi_{C_3H_6}^M + 3,8 \cdot \varphi_{C_nH_m}^M - \varphi_{O_2}^M$$

$$O_{min}^{n=0,9} = 0,5 \cdot \frac{1,9162}{100} + 0,5 \cdot \frac{19,6419}{100} = \mathbf{0,1078 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}}$$

Skutečné množství spalovacího vzduchu pro $n = 0,9$

$$L_{skut} = O_{min}^{n=0,9} \cdot n \cdot \frac{100}{21} \quad (\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}) \quad (41)$$

$$L_{skut} = 0,1078 \cdot 0,9 \cdot \frac{100}{21} = \mathbf{0,4620 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}}$$

Spotřeba kyslíku pro dokonalé spálení vodíku v palivu

$$O_{min}^{H \rightarrow H_2O} = 0,5 \cdot H_2 \quad (42)$$

$$O_{min}^{H \rightarrow H_2O} = 0,5 \cdot 0,0192 = 0,0096 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$$

Množství kyslíku, které je k dispozici pro další dokonalé spálení vysokopecního plynu:

$$O_{skut} - O_{min}^{H \rightarrow H_2O} = 0,1078 - 0,0096 = 0,0982 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$$

Vypočtené hodnota kyslíku $0,0982 \text{ m}^3$ umožní dokonalé spálení části oxidu uhelnatého pouze v hodnotě 19,64 % a zbytek oxidu uhelnatého přejde do spalin. To znamená, že 2,3954 % oxidu uhelnatého přejde do spalin.

Přebytek vzduchu $n = 0,9$ stačí pouze na spálení 19,64 % CO

$22,0373 \% - 19,1629 \% = 2,3954 \% \text{ CO}$ přejde nespálené do spalin

Chemické složení VP plynu je uvedeno v tabulce 9.

Tabulka 9. Složení vysokopecního plynu při smíšeném spalování ($n = 0,9$)

Název prvku	Chemická značka	Množství	Jednotka
Oxid uhelnatý	CO	19,6419	%
Vodík	H ₂	1,9162	%
Oxid uhličitý	CO ₂	18,2048	%
Dusík	N ₂	53,6561	%
Voda	H ₂ O	4,1855	%
Oxid uhelnatý, který přejde do spalin	CO	2,3954	%
Celkem	Σ	100	%

Stanovení objemu oxidu uhličitého ve spalinách dle rovnice (28)

$$V_{CO_2} = \varphi_{CO}^M + \varphi_{CO_2}^M + \varphi_{CH_4}^M + 2 \cdot \varphi_{C_2H_6}^M + 3 \cdot \varphi_{C_3H_8}^M + 4 \cdot \varphi_{C_4H_{10}}^M + 2 \cdot \varphi_{C_2H_4}^M + 3 \cdot \varphi_{C_3H_6}^M + 2,6 \cdot \varphi_{C_nH_m}^M = \frac{19,64}{100} + \frac{18,2}{100} = 0,3780 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$$

Stanovení objemu vody ve spalinách dle rovnice (29)

$$V_{H_2O} = \varphi_{H_2}^M + 2 \cdot \varphi_{CH_4}^M + 3 \cdot \varphi_{C_2H_6}^M + 4 \cdot \varphi_{C_3H_8}^M + 5 \cdot \varphi_{C_4H_{10}}^M + 2 \cdot \varphi_{C_2H_4}^M + 3 \cdot \varphi_{C_3H_6}^M + 2,4 \cdot \varphi_{C_nH_m}^M + \varphi_{H_2O}^M = \frac{1,92}{100} + \frac{4,19}{100} = 0,0610 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$$

Objem dusíku ve spalínách dle rovnice (30)

$$V_{N_2} = \varphi_{N_2}^M + O_{min}^{n=0,9} \cdot \frac{79}{21} \cdot n = \frac{53,6561}{100} + 0,1078 \cdot \frac{79}{21} \cdot 0,9 = \mathbf{0,9015 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}}$$

Objem oxidu uhelnatého ve spalínách

$$V_{CO} = \mathbf{0,02395 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}}$$

Celkový objem spalin dle rovnice (32)

$$V_{SP} = V_{CO_2} + V_{H_2O} + V_{N_2} + V_{CO} = 0,3785 + 0,0611 + 0,9015 + 0,02395$$

$$V_{SP} = \mathbf{1,3649 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}}$$

Výsledky smíšeného objemového spalování jsou uvedeny v tabulce č. 10.

Tabulka 10. Objemové spalování VP při smíšeném spalování ($n = 0,9$)

Spalovací proces	Značka	Hodnota	Jednotka
Minimální množství kyslíku	$O_{min}^{n=0,9}$	0,1078	$\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$
Skutečné množství spalovacího vzduchu	L_{skut}	0,4620	$\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$
Objem oxidu uhličitého ve spalínách	V_{CO_2}	0,3780	$\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$
Objem vody ve spalínách	V_{H_2O}	0,0610	$\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$
Objem dusíku ve spalínách	V_{N_2}	0,9015	$\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$
Objem oxidu uhelnatého ve spalínách	V_{CO}	0,0239	$\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$
Celkový objem spalin	V_{SP}	1,3649	$\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$

Stanovení přehřátí plynu

Přehřátí vysokopecního plynu u smíšeného spalování Q_{pl} je totožné s přehřátím plynu u dokonalého spalování.

$$Q_{pl} = \mathbf{41,0351 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3}}$$

Stanovení přehřátí vzduchu dle rovnice (39)

$$Q_{vz} = L_{skut} \cdot i_{vz}^{t_{vz}} = 0,4620 \cdot 213,29 = \mathbf{98,5399 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3}}$$

Stanovení entalpie spalin

Při výpočtu entalpie spalin i_{sp} je nutno odečíst chemický nedopal oxidu uhelnatého CO.

$$Q_{ch, ned} = V_{CO} \cdot Q_i^{CO} \quad (\text{J} \cdot \text{m}^{-3}) \quad (43)$$

$$Q_{ch, ned} = 0,0239 \cdot 12640 = \mathbf{302,7737 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3}}$$

kde $Q_{Ch, ned}$ je chemický nedopal ($J \cdot m^{-3}$)

$$i_{sp} = \frac{Q_i^{VL} + Q_{vz} + Q_{pl} - Q_{Ch, ned}}{V_{sp}} \quad (J \cdot m^{-3}) \quad (44)$$

$$i_{sp} = \frac{2910,6322 + 109,4812 + 41,0351 - 302,7737}{1,3649} = 2020,8615 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3}$$

Pro vypočtenou hodnotu měrné entalpie i_{sp} byla určena teoretická spalná teplota $t_t = 1210,70 \text{ } ^\circ\text{C}$.

8.1.5 Výpočet praktické spalné teploty pro smíšené spalování

Praktická teplota je teoretická teplota vynásobena pyrometrickým efektem η_{pyr} . Pro tento výpočet by zvolen $\eta_{pyr} = 0,75$. Výpočet je dle rovnice (40)

$$t_p = t_t \cdot \eta_{pyr} = 1210,70 \cdot 0,75 = 908,03 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Hodnoty teoretické a praktické teploty při smíšeném spalování jsou uvedeny v tabulce č. 11.

Tabulka 11. Porovnání spalných teplot vysokopecního plynu při smíšeném spalování ($n = 0,9$)

Spalná teplota	Značka	Hodnota	Jednotka
Teoretická	t_t	1210,70	$^\circ\text{C}$
Praktická	t_p	908,03	$^\circ\text{C}$

8.2 Koksárenský plyn

Obsahem této kapitoly je stanovení třech typů spalných teplot (adiabatická, teoretická a praktická) pro koksárenský plyn.

Chemické složení a parametry koksárenského plynu jsou uvedeny v tab. 12 a tab. 13.

Tabulka 12. Chemické složení koksárenského plynu

Název prvku	Chemická značka	Množství	Jednotka
Oxid uhelnatý	CO	5,5	%
Vodík	H ₂	55,0	%
Metan	CH ₄	25,0	%
Oxid uhličitý	CO ₂	4,5	%
Dusík	N ₂	9,0	%
Kyslík	O ₂	1,0	%
Celkem	Σ	100	%

Protože u koksárenského plynu je uváděna vlhkost 100%, je nutno složení suchého plynu, uvedeného v tabulce 12, přepočítat na vlhký.

Tabulka 13. Parametry koksárenského plynu

Název	Značka	Hodnota	Jednotka
Teplota plynu	t_{pl}	15,0	°C
Teplota spalovacího vzduchu	t_{vz}	160,0	°C
Součinitel přebytku vzduchu	n	1,1	-
Pyrometrický efekt	η_{pyr}	0,7	-
Vlhkost plynu	-	100	%

Výpočet výhřevnosti koksárenského plynu

Výhřevnost suchého koksárenského plynu se počítá obdobně jako u plynu vysokopecního. Rozdíl je pouze v zastoupení jednotlivých složek.

Přepočet složek suchého plynu na vlhký dle rovnice (21)

$$V_{H_2O} = \frac{P_{nas}^{30} \cdot \varphi}{P_c} \cdot V_c = \frac{1,704 \cdot 1}{101,325} \cdot 1 = \mathbf{0,0168 \text{ m}^3}$$

kde P_{nas}^{30} je parciální tlak vodní páry pro 15 °C (kPa),

φ – nasycení vodní pár (%),

P_c – celkový tlak plynu – součet atmosférického tlaku a přetlaku (kPa),

V_c – celkový objem plynu (m^3).

Přepočet suchého plynu na plyn vlhký dle rovnice (22)

$$\varphi_i^M = \varphi_i \cdot (1 - V_{H_2O})$$

kde φ_i^M je objemový podíl jednotlivých složek ve vlhkém plynu (%),

φ_i – objemový podíl jednotlivých složek v suchém plynu (%)

$$\varphi_{CO}^M = 5,5 \cdot (1 - 0,0168) = \mathbf{5,4076 \%}$$

$$\varphi_{CO_2}^M = 4,5 \cdot (1 - 0,0168) = \mathbf{4,4243 \%}$$

$$\varphi_{H_2}^M = 55 \cdot (1 - 0,0168) = \mathbf{54,0751 \%}$$

$$\varphi_{N_2}^M = 9 \cdot (1 - 0,0168) = \mathbf{8,8487 \%}$$

$$\varphi_{CH_4}^M = 25 \cdot (1 - 0,0168) = \mathbf{24,5796 \%}$$

$$\varphi_{O_2}^M = 1 \cdot (1 - 0,0168) = \mathbf{0,9832 \%}$$

$$\varphi_{H_2O}^M = 0,0168 \cdot 100 = \mathbf{1,6817 \%}$$

V tabulce č. 14 je uvedeno složení vlhkého koksárenského plynu, které bude použito pro výpočet spalných teplot.

Tabulka 14. Chemické složení vlhkého koksárenského plynu

φ_{CO}^M (%)	$\varphi_{CO_2}^M$ (%)	$\varphi_{H_2}^M$ (%)	$\varphi_{N_2}^M$ (%)	$\varphi_{CH_4}^M$ (%)	$\varphi_{O_2}^M$ (%)	$\varphi_{H_2O}^M$ (%)	Σ (%)
5,4076	4,4243	54,0751	8,8487	24,5796	0,9832	1,6817	100

Výpočet výhřevnosti vlhkého plynu se stanoví podle rovnice (23)

$$Q_i^M = \sum_{n=1}^n \varphi_i \cdot Q_s - 19,6 \cdot (\varphi_{H_2}^M - \varphi_{H_2O}^M) = 12,64 \cdot \frac{5,4076}{100} + 12,77 \cdot \frac{54,0751}{100} + 35,8 \cdot \frac{24,5796}{100} - 19,6 \cdot \left(\frac{54,0751}{100} + \frac{1,6817}{100} \right) = \mathbf{15,2956 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-3}}$$

8.2.1 Výpočet adiabatické spalné teploty pro dokonalé spalování

Adiabatická spalná teplota t_a se stanoví dle rovnice (36)

Výpočet objemového spalování

Minimální množství kyslíku dle rovnice (25)

$$O_{min} = 0,5 \cdot \varphi_{CO}^M + 0,5 \cdot \varphi_{H_2}^M + 1,5 \cdot \varphi_{H_2S}^M + 2 \cdot \varphi_{CH_4}^M + 3,5 \cdot \varphi_{C_2H_6}^M + 5 \cdot \varphi_{C_3H_8}^M + 6,5 \cdot \varphi_{C_4H_{10}}^M + 3 \cdot \varphi_{C_2H_4}^M + 4,5 \cdot \varphi_{C_3H_6}^M + 3,8 \cdot \varphi_{C_nH_m}^M - \varphi_{O_2}^M$$

$$O_{min} = 0,5 \cdot \frac{5,4076}{100} + 0,5 \cdot \frac{54,0751}{100} + 2 \cdot \frac{24,5796}{100} = \mathbf{0,7792 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}}$$

Minimální množství spalovacího vzduchu dle rovnice (26)

$$L_{min} = O_{min} \cdot \frac{100}{21} = 0,7792 \cdot \frac{100}{21} = \mathbf{3,7103 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}}$$

Skutečné množství spalovacího vzduchu dle rovnice (27)

$$L_{skut} = L_{min} \cdot n = 3,7103 \cdot 1 = \mathbf{3,7103 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}}$$

Stanovení objemu oxidu uhličitého ve spalínách dle rovnice (28)

$$V_{CO_2} = \varphi_{CO}^M + \varphi_{CO_2}^M + \varphi_{CH_4}^M + 2 \cdot \varphi_{C_2H_6}^M + 3 \cdot \varphi_{C_3H_8}^M + 4 \cdot \varphi_{C_4H_{10}}^M + 2 \cdot \varphi_{C_2H_4}^M + 3 \cdot \varphi_{C_3H_6}^M + 2,6 \cdot \varphi_{C_nH_m}^M = \frac{54,0751}{100} + \frac{4,4243}{100} + \frac{24,5796}{100} = \mathbf{0,3441 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}}$$

Stanovení objemu vody ve spalínách dle rovnice (29)

$$V_{H_2O} = \varphi_{H_2}^M + 2 \cdot \varphi_{CH_4}^M + 3 \cdot \varphi_{C_2H_6}^M + 4 \cdot \varphi_{C_3H_8}^M + 5 \cdot \varphi_{C_4H_{10}}^M + 2 \cdot \varphi_{C_2H_4}^M + 3 \cdot \varphi_{C_3H_6}^M + 2,4 \cdot \varphi_{C_nH_m}^M + \varphi_{H_2O}^M = \frac{54,0751}{100} + 2 \cdot \frac{24,5796}{100} + \frac{4,4243}{100}$$

$$V_{H_2O} = \mathbf{1,0492 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}}$$

Objem dusíku ve spalínách dle rovnice (30)

$$V_{N_2} = \varphi_{N_2}^M + O_{min} \cdot \frac{79}{21} \cdot n = 0,08849 + 0,7792 \cdot \frac{79}{21} \cdot 1 = \mathbf{3,0197 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}}$$

Výpočet objemu kyslíku ve spalínách dle rovnice (31)

$$V_{O_2} = O_{min} \cdot (n - 1) = 0,7792 \cdot (1 - 1) = 0 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$$

Celkový objem spalín dle rovnice (32)

$$V_{SP} = V_{CO_2} + V_{H_2O} + V_{N_2} + O_2 = 0,3441 + 1,0492 + 3,0197 = 4,4129 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$$

Výsledky objemového spalování koksárenského plynu při přebytku vzduchu $n = 1$ je uveden tabulce 15.

Tabulka 15. Objemové spalování KP pro adiabatickou spalnou teplotu ($n = 1$)

Spalovací proces	Značka	Hodnota	Jednotka
Minimální množství kyslíku	O_{min}	0,7791	$\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$
Minimální množství spalovacího vzduchu	L_{min}	3,7103	$\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$
Skutečné množství spalovacího vzduchu	L_{skut}	3,7103	$\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$
Objem oxidu uhličitého ve spalínách	V_{CO_2}	0,3441	$\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$
Objem vody ve spalínách	V_{H_2O}	1,0492	$\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$
Objem dusíku ve spalínách	V_{N_2}	3,0197	$\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$
Objem kyslíku ve spalínách	V_{O_2}	0,0	$\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$
Celkový objem spalín	V_{SP}	4,4129	$\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$

Stanovení entalpie spalín dle rovnice (33)

$$i_{sp} = \frac{Q_i^M + Q_{vz} + Q_{pl}}{V_{sp}} = \frac{15295,55 + 0 + 0}{4,4129} = 3466,0736 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3}$$

Pro vypočtenou hodnotu měrné entalpie i_{sp} byla určena, v závislosti na složení spalín, adiabatická spalná teplota o hodnotě $t_a = 2079,54 \text{ }^\circ\text{C}$.

8.2.2 Výpočet teoretické spalné teploty pro dokonalé spalování

Součinitel přebytku vzduchu pro koksárenský plyn je stanoven $n = 1,1$, předeřtí plynu $t_{pl} = 15 \text{ }^\circ\text{C}$, teplota předeřtí vzduchu $t_{vz} = 160 \text{ }^\circ\text{C}$.

Teoretická spalná teplota t_i se stanoví dle rovnice (36)

Výpočet objemového spalování

Minimální množství kyslíku dle rovnice (25)

$$O_{min} = 0,5 \cdot \varphi_{CO}^M + 0,5 \cdot \varphi_{H_2}^M + 1,5 \cdot \varphi_{H_2S}^M + 2 \cdot \varphi_{CH_4}^M + 3,5 \cdot \varphi_{C_2H_6}^M + 5 \cdot \varphi_{C_3H_8}^M + 6,5 \cdot \varphi_{C_4H_{10}}^M + 3 \cdot \varphi_{C_2H_4}^M + 4,5 \cdot \varphi_{C_3H_6}^M + 3,8 \cdot \varphi_{C_nH_m}^M - \varphi_{O_2}^M$$

$$O_{min} = 0,5 \cdot \frac{5,4075}{100} + 0,5 \cdot \frac{54,0751}{100} + 2 \cdot \frac{24,5796}{100} = 0,7792 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$$

Minimální množství spalovacího vzduchu dle rovnice (26)

$$L_{min} = O_{min} \cdot \frac{100}{21} = 0,7792 \cdot \frac{100}{21} = \mathbf{3,7103 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}}$$

Skutečné množství spalovacího vzduchu dle rovnice (27)

$$L_{skut} = L_{min} \cdot n = 3,7103 \cdot 1,1 = \mathbf{4,0831 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}}$$

Stanovení objemu oxidu uhličitého dle rovnice (28)

$$V_{CO_2} = \varphi_{CO}^M + \varphi_{CO_2}^M + \varphi_{CH_4}^M + 2 \cdot \varphi_{C_2H_6}^M + 3 \cdot \varphi_{C_3H_8}^M + 4 \cdot \varphi_{C_4H_{10}}^M + 2 \cdot \varphi_{C_2H_4}^M + \\ + 3 \cdot \varphi_{C_3H_6}^M + 2,6 \cdot \varphi_{C_nH_m}^M = \frac{5,4075}{100} + \frac{1,6817}{100} + \frac{24,5796}{100} = \mathbf{0,3441 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}}$$

Stanovení množství vodní páry dle rovnice (29)

$$V_{H_2O} = \varphi_{H_2}^M + 2 \cdot \varphi_{CH_4}^M + 3 \cdot \varphi_{C_2H_6}^M + 4 \cdot \varphi_{C_3H_8}^M + 5 \cdot \varphi_{C_4H_{10}}^M + 2 \cdot \varphi_{C_2H_4}^M + \\ + 3 \cdot \varphi_{C_3H_6}^M + 2,4 \cdot \varphi_{C_nH_m}^M + \varphi_{H_2O}^M = \frac{54,0751}{100} + 2 \cdot \frac{24,5796}{100} + \frac{1,6817}{100}$$

$$V_{H_2O} = \mathbf{1,0492 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}}$$

Objem dusíku dusíku ve spalínách dle rovnice (30)

$$V_{N_2} = \varphi_{N_2}^M + O_{min} \cdot \frac{79}{21} \cdot n = 0,0885 + 0,7792 \cdot \frac{79}{21} \cdot 1,1 = \mathbf{3,3313 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}}$$

Výpočet vzduchového kyslíku dle rovnice (31)

$$V_{O_2} = O_{min} \cdot (n - 1) = 0,7792 \cdot (1,1 - 1) = \mathbf{0,0779 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}}$$

Celkový objem spalín dle rovnice (332)

$$V_{SP} = V_{CO_2} + V_{H_2O} + V_{N_2} + O_2 = 0,3441 + 1,0492 + 3,3128 + 0,0779$$

$$V_{SP} = \mathbf{4,7839 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}}$$

Výsledky objemového spalování koksárenského plynu při přebytku vzduchu $n = 1,1$ jsou uvedeny v tabulce 16.

Tabulka 16. Objemové spalování KP pro teoretickou spalnou teplotu ($n = 1,1$)

Spalovací proces	Značka	Hodnota	Jednotka
Minimální množství kyslíku	O_{\min}	0,7792	$\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$
Minimální množství spalovacího vzduchu	L_{\min}	3,7103	$\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$
Skutečné množství spalovacího vzduchu	L_{skut}	4,0813	$\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$
Objem oxidu uhličitého ve spalínách	V_{CO_2}	0,3313	$\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$
Objem vody ve spalínách	$V_{\text{H}_2\text{O}}$	1,0492	$\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$
Objem dusíku ve spalínách	V_{N_2}	3,3128	$\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$
Objem kyslíku ve spalínách	V_{O_2}	0,0779	$\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$
Celkový objem spalín	V_{SP}	4,7839	$\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$

Stanovení přehřátí plynu dle rovnice (38) [22]

$$i_{pl} = \sum_{i=1}^n \varphi_i \cdot i_i = \varphi_{\text{CO}}^M \cdot i_{\text{CO}}^{pl} + \varphi_{\text{H}_2}^M \cdot i_{\text{H}_2}^{pl} + \varphi_{\text{CO}_2}^M \cdot i_{\text{CO}_2}^{pl} + \varphi_{\text{N}_2}^M \cdot i_{\text{N}_2}^{pl} + \varphi_{\text{H}_2\text{O}}^M \cdot i_{\text{H}_2\text{O}}^{pl} + \varphi_{\text{CH}_4}^M \cdot i_{\text{CH}_4}^{pl} + \varphi_{\text{O}_2}^M \cdot i_{\text{O}_2}^{pl}$$

$$i_{pl} = 0,05408 \cdot 19,42 + 0,5475 \cdot 19,31 + 0,04424 \cdot 24,7 + 0,0168 \cdot 22,39 + 0,2458 \cdot 23,9 + 0,0098 \cdot 19,41 = \mathbf{20,7562 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3}}$$

$$i_{pl} = Q_{pl}$$

Stanovení přehřátí plynu dle rovnice (39)

$$Q_{vz} = L_{\text{skut}} \cdot i_{vz}^{t_{vz}} = 4,0814 \cdot 213,29 = \mathbf{870,5337 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3}}$$

Stanovení entalpie vzduchu dle rovnice (33)

$$i_{sp} = \frac{Q_i^M + Q_{vz} + Q_{pl}}{V_{sp}} = \frac{15295,55 + 20,7562 + 870,5337}{4,7839} = \mathbf{3383,5599 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3}}$$

Dle využití tabulek [22] s přihlédnutím ke složení vzniklých spalín je teoretická spalná teplota pro výše uvedené podmínky $t_t = 2065,39 \text{ }^\circ\text{C}$

8.2.3 Výpočet praktické spalné teploty pro dokonalé spalování

Praktická teplota koksárenského plynu se stanoví dle rovnice (48). Pro tento výpočet by zvolen $\eta_{\text{pyr}} = 0,75$.

$$t_p = t_t \cdot \eta_{\text{pyr}} = 2065,395 \cdot 0,75 = \mathbf{1549,05 \text{ }^\circ\text{C}}$$

Hodnoty všech tří vybraných spalných teplot koksárenského plynu jsou uvedeny v tabulce č. 17.

Tabulka 17. Porovnání spalných teplot koksárenského plynu

Spalná teplota	Značka	Hodnota	Jednotka
Adiabatická	t_a	2079,54	°C
Teoretická	t_t	2065,39	°C
Praktická	t_p	1549,05	°C

8.2.4 Výpočet teoretické spalné teploty pro smíšené spalování

Součinitel přebytku vzduchu pro koksárenský plyn je stanoven pro vzorový výpočet $n = 0,9$, předehřátí plynu $t_{pl} = 15$ °C, teplota předehřátí vzduchu $t_{vz} = 160$ °C.

Výpočet objemového spalování pro vybranou hodnotu $n = 0,9$

Minimální množství kyslíku pro spalování koksárenského plynu je totožné s minimálním množstvím kyslíku pro dokonalé spalování (viz rovnice 25).

$$O_{min} = 0,7792 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$$

Skutečné množství kyslíku pro $n = 0,9$ dle rovnice (42)

$$O_{skut} = O_{min} \cdot n \quad (\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3})$$

$$O_{skut} = O_{min} \cdot n = 0,7791 \cdot 0,9 = 0,7012 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$$

Tato skutečná spotřeba kyslíku, vzhledem k uvedené hodnotě n , však je nedostatečná pro dokonalé spálení tohoto plynu. Je nutné stanovit, kolik procent z přítomného oxidu uhelnatého přejde do spalin. Proto od O_{skut} se odečte spotřeba kyslíku pro složení vodíku a methanu.

Spotřeba kyslíku O_2^{CO}

$$O_2^{CO} = 0,7012 - 0,5 \cdot 0,5408 - 2 \cdot 0,2458 = - 0,0607 \text{ m}^3$$

Protože výsledné hodnoty vychází záporné, přejde veškerý přítomný oxid uhelnatý z koksárenského plynu do spalin a ještě část methanu bude spalována smíšeným způsobem. Jaké bude procentuální zastoupení dokonale a nedokonale spáleného methanu se určí na základě požadované spotřeby kyslíku $O_{min}^{CH_4}$ pro methan v oblasti dokonalého spalování, od které se odečte chybějící kyslík v důsledku přebytku vzduchu $n = 0,9$. Procento dokonale a nedokonale spáleného methanu v koksárenském plynu se určí dle poměrové rovnice.

$$O_{min}^{CH_4} = 2 \cdot 0,2458 = 0,4916 \text{ m}^3$$

Dispoziční množství kyslíku pro CH_4 :

$$O_{disp}^{CH_4} = O_{min}^{CH_4} - O_2^{CO} = 0,4916 - 0,0607 = 0,4308 \text{ m}^3$$

Poměrová rovnice:

$$1,5 \cdot CH_4 \cdot (1 - x) + 2 \cdot CH_4 \cdot x = O_{disp}^{CH_4}$$

$$1,5 \cdot 0,2458 \cdot (1 - x) + 2 \cdot 0,2458 \cdot x = 0,4308$$

$$x = 0,5061$$

Množství CH_4 , které shoří dokonale:

$$0,2458 \text{ kg } CH_4 \cdot x = 0,2458 \cdot 0,5061 = 0,1244 \text{ kg } CH_4$$

Množství CH_4 , které shoří nedokonale:

$$0,2458 \text{ kg } CH_4 \cdot x = 0,2458 \cdot 0,4939 = 0,1214 \text{ kg } CH_4$$

Chemické složení KP plynu pro $n = 0,9$ je uvedeno v tabulce 18.

Tabulka 18. Složení koksárenského plynu při smíšeném spalování ($n = 0,9$)

Název prvku	Chemická značka	Množství	Jednotka
Methan	CH_4	12,4373	%
Nespálený methan	CH_4	12,1423	%
Vodík	H_2	54,0751	%
Oxid uhličitý	CO_2	4,4075	%
Dusík	N_2	8,8486	%
Voda	H_2O	1,6817	%
kyslík	O_2	0,9832	%
Nespálený oxid uhelnatý	CO	5,4075	%
Celkem	Σ	100	%

Stanovení objemu oxidu uhličitého ve spalinách dle rovnice (28)

$$V_{CO_2} = \varphi_{CO}^M + \varphi_{CO_2}^M + \varphi_{CH_4}^M + 2 \cdot \varphi_{C_2H_6}^M + 3 \cdot \varphi_{C_3H_8}^M + 4 \cdot \varphi_{C_4H_{10}}^M + 2 \cdot \varphi_{C_2H_4}^M + 3 \cdot \varphi_{C_3H_6}^M + 2,6 \cdot \varphi_{C_nH_m}^M = \frac{12,4373}{100} + \frac{4,4243}{100} = \mathbf{0,1686 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}}$$

Stanovení množství vodní páry dle rovnice (29)

$$V_{H_2O} = \varphi_{H_2}^M + 2 \cdot \varphi_{CH_4}^M + 3 \cdot \varphi_{C_2H_6}^M + 4 \cdot \varphi_{C_3H_8}^M + 5 \cdot \varphi_{C_4H_{10}}^M + 2 \cdot \varphi_{C_2H_4}^M + 3 \cdot \varphi_{C_3H_6}^M + 2,4 \cdot \varphi_{C_nH_m}^M + \varphi_{H_2O}^M = \frac{2 \cdot 12,4373}{100} + \frac{2 \cdot 12,1423}{100} + \frac{54,0751}{100} + \frac{1,6817}{100}$$

$$V_{H_2O} = \mathbf{1,0492 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}}$$

Objem dusíku ve spalínách dle rovnice (30)

$$V_{N_2} = \varphi_{N_2}^M + O_{min}^{n=0,9} \cdot \frac{79}{21} \cdot n = \frac{8,8486}{100} + 0,6914 \cdot \frac{79}{21} \cdot 0,9 = \mathbf{2,4294 \, m^3 \cdot m^{-3}}$$

kde: $O_{min}^{n=0,9}$ je množství kyslíku pro smíšené spalování

Objem oxidu uhelnatého ve spalínách

$$V_{CO} = \frac{0,1214}{100} + \frac{5,4075}{100} = \mathbf{0,1755 \, m^3 \cdot m^{-3}}$$

Celkový objem spalin dle rovnice (32)

$$V_{SP} = V_{CO_2} + V_{H_2O} + V_{N_2} + V_{CO} = 0,1687 + 1,0492 + 2,4294 + 0,1755$$

$$V_{SP} = \mathbf{3,8227 \, m^3 \cdot m^{-3}}$$

Skutečné množství spalovacího vzduchu dle rovnice (27)

$$L_{skut} = O_{min}^{n=0,9} \cdot n \cdot \frac{100}{21} = \mathbf{2,9633 \, m^3 \cdot m^{-3}}$$

Výsledky smíšeného objemového spalování jsou uvedeny v tabulce č. 19.

Tabulka 19. Objemové spalování KP při smíšeném spalování ($n = 0,9$)

Spalovací proces	Značka	Hodnota	Jednotka
Minimální množství kyslíku	O_{min}	0,7791	$m^3 \cdot m^{-3}$
Minimální množství kyslíku pro smíšené spalování	$O_{min}^{n=0,9}$	0,6914	$m^3 \cdot m^{-3}$
Skutečné množství kyslíku	O_{skut}	0,7013	$m^3 \cdot m^{-3}$
Skutečné množství spalovacího vzduchu	L_{skut}	2,9633	$m^3 \cdot m^{-3}$
Objem oxidu uhličitého ve spalínách	V_{CO_2}	0,1686	$m^3 \cdot m^{-3}$
Objem vody ve spalínách	V_{H_2O}	1,0492	$m^3 \cdot m^{-3}$
Objem dusíku ve spalínách	V_{N_2}	2,4294	$m^3 \cdot m^{-3}$
Objem oxidu uhelnatého ve spalínách	V_{CO}	0,1755	$m^3 \cdot m^{-3}$
Celkový objem spalin	V_{SP}	3,8227	$m^3 \cdot m^{-3}$

Stanovení předehtátí plynu

Předehtátí vysokopecního plynu u smíšeného spalování Q_{pl} je totožné s předehtátím plynu u dokonalého spalování (viz kapitola 8.2.2)

$$Q_{pl} = \mathbf{20,7562 \, kJ \cdot m^{-3}}$$

Stanovení přehřátí vzduchu dle rovnice (46)

$$Q_{vz} = L_{skut} \cdot i_{vz}^{t_{vz}} = 2,9633 \cdot 213,29 = \mathbf{632,0419 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3}}$$

Stanovení entalpie spalin

Při výpočtu entalpie spalin i_{sp} je nutno odečíst chemický nedopal oxidu uhelnatého dle rovnice (43)

$$Q_{Ch, ned} = V_{CO} \cdot Q_i^{CO} = 0,1755 \cdot 12640 = \mathbf{2218,2964 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3}}$$

Stanovení entalpie spalin dle rovnice (44)

$$i_{sp} = \frac{Q_i^{VL} + Q_{vz} + Q_{pl} - Q_{Ch, ned}}{V_{sp}} = \frac{15295,55 + 632,0419 + 20,7562 - 2218,2964}{3,8227} = \mathbf{3591,6948 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3}}$$

Pro vypočtenou hodnotu měrné entalpie i_{sp} byla určena hodnota teoretické spalné teploty koksárenského plynu ($n = 0,9$).

$$t_t = \mathbf{2133,5307 \text{ } ^\circ\text{C}}$$

8.2.5 Výpočet praktické spalné teploty pro smíšené spalování

Praktická teplota je teoretická teplota vynásobena pyrometrickým efektem η_{pyr} . Pro tento výpočet by zvolen $\eta_{pyr} = 0,75$.

$$t_p = t_t \cdot \eta_{pyr} \quad (^\circ\text{C})$$

$$t_p = 2133,5307 \cdot 0,75 = \mathbf{1600,15 \text{ } ^\circ\text{C}}$$

Hodnoty teoretické a praktické teploty při smíšeném spalování jsou uvedeny v tabulce č. 20.

Tabulka 20. Porovnání spalných teplot koksárenského plynu při smíšeném spalování

Spalná teplota	Značka	Hodnota	Jednotka
Teoretická	t_t	2133,53	$^\circ\text{C}$
Praktická	t_p	1600,15	$^\circ\text{C}$

8.3 Uhlí

Obsahem této kapitoly je stanovení třech typů spalných teplot (adiabatická, teoretická a praktická) pro uhlí, jejich stanovení je na stejném principu jako u předcházejících plyných paliv. Výpočet spalování je objemový.

Chemické složení a parametry uhlí jsou uvedeny v tab. 21 a tab. 22.

Tabulka 21. Chemické složení uhlí

Název prvku	Chemická značka	Množství	Jednotka
Uhlík	C	64,09	%
Vodík	H	3,59	%
Dusík	N	0,94	%
Síra	S	0,46	%
Kyslík	O	3,72	%
Vlhkost	W	1,0	%
Popeloviny	A	26,2	%
Celkem	Σ	100	%

Tabulka 22. Parametry uhlí

Název	Značka	Hodnota	Jednotka
Teplota uhlí	t_{uh}	90	°C
Teplota spalovacího vzduchu	t_{vz}	160	°C
Součinitel přebytku vzduchu	n	1,0	-

Výpočet výhřevnosti uhlí

Výhřevnost uhlí se stanoví podle svazové rovnice:

$$Q_i = 339 \cdot w_C + 1214 \left(w_H - \frac{w_O}{8} \right) + 105 \cdot w_S - 25 \cdot w_W \quad (\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}) \quad (45)$$

$$Q_i = 339 \cdot 64,04 + 1214 \left(3,59 - \frac{3,47}{8} \right) + 105 \cdot 0,46 - 25 \cdot 1$$

$$Q_i = \mathbf{25\,543,56 = \text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}}$$

kde w_C je hmotnostní podíl uhlíku (%),

w_H – hmotnostní podíl vodíku (%),

w_S – hmotnostní podíl síry (%),

w_W – hmotnostní podíl vody (%).

8.3.1 Výpočet adiabatické spalné teploty pro dokonalé spalování

Adiabatická spalná teplota t_a se stanoví dle rovnice (36)

Výpočet objemového spalování

Minimální množství kyslíku je dáno vztahem:

$$O_{min} = 1,87 \cdot \frac{w_C}{100} + 5,6 \cdot \frac{w_H}{100} + 0,7 \cdot \frac{w_S}{100} - 0,7 \cdot \frac{w_O}{100} \quad (\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}) \quad (46)$$

$$O_{min} = 1,87 \cdot 0,6404 + 5,6 \cdot 0,0359 + 0,7 \cdot 0,0046 - 0,7 \cdot 0,0347$$

$$O_{min} = \mathbf{1,3767 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}}$$

Minimální množství spalovacího vzduchu dle rovnice (26)

$$L_{min} = O_{min} \cdot \frac{100}{21} = 1,3767 \cdot \frac{100}{21} = \mathbf{6,5557 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}}$$

Skutečné množství spalovacího vzduchu pro n=1 dle rovnice (27)

$$L_{skut} = L_{min} \cdot n = 6,5557 \cdot 1 = \mathbf{6,5557 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}}$$

Objem oxidu uhličitého ve spalínách:

$$V_{CO_2} = 1,87 \cdot \frac{w_C}{100} \quad (\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-3}) \quad (47)$$

$$V_{CO_2} = 1,87 \cdot 0,064 = \mathbf{1,1985 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}}$$

Objem oxidu siřičitého ve spalínách:

$$V_{SO_2} = 0,7 \cdot \frac{w_S}{100} \quad (\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-3}) \quad (48)$$

$$V_{SO_2} = 0,7 \cdot 0,0046 = \mathbf{0,0032 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}}$$

Objem vody ve spalínách:

$$V_{H_2O} = 11,2 \cdot \frac{w_H}{100} + 1,24 \cdot w \quad (\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}) \quad (49)$$

$$V_{H_2O} = 11,2 \cdot 0,0359 + 1,24 \cdot 0,001 = \mathbf{0,4145 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}}$$

Objem dusíku ve spalínách:

$$V_{N_2} = 0,8 \cdot \frac{w_N}{100} + O_{min} \cdot n \cdot 3,76 \quad (\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}) \quad (50)$$

$$V_{N_2} = 0,8 \cdot 0,0094 + 1,3767 \cdot 1 \cdot 3,76 = \mathbf{5,1865 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}}$$

Vzduchový kyslík pro n = 1 dle rovnice (31)

$$V_{O_2} = O_{min} \cdot (n - 1) = 1,3767 \cdot (1 - 1) = \mathbf{0 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}}$$

Celkový objem spalín:

$$V_{SP} = V_{CO_2} + V_{SO_2} + V_{H_2O} + V_{N_2} + O_2 \quad (\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}) \quad (51)$$

$$V_{SP} = 1,1987 + 0,0032 + 0,4144 + 5,1865 + 0 = \mathbf{6,8027 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}}$$

Výsledky objemového spalování uhlí při přebytku vzduchu $n = 1$ jsou uvedeny v tabulce 23.

Tabulka 23. Objemové spalování uhlí pro adiabatickou spalnou teplotu ($n=1$)

Spalovací proces	Značka	Hodnota	Jednotka
Minimální množství kyslíku	O_{\min}	1,3767	$\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$
Minimální množství spalovacího vzduchu	L_{\min}	6,5557	$\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$
Skutečné množství spalovacího vzduchu	L_{skut}	6,5557	$\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$
Objem oxidu uhličitého ve spalinách	V_{CO_2}	1,1985	$\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-1}$
Objem oxidu siřičitého ve spalinách	V_{SO_2}	0,0032	$\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$
Objem vody ve spalinách	$V_{\text{H}_2\text{O}}$	0,4145	$\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$
Objem dusíku ve spalinách	V_{N_2}	5,1865	$\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$
Objem kyslíku ve spalinách	V_{O_2}	0,0	$\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$
Celkový objem spalin	V_{SP}	6,8027	$\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$

Stanovení entalpie spalin bez přehřevu vzduchu a plynu dle rovnice (33)

$$i_{sp} = \frac{Q_i^{VL} + Q_{vz} + Q_{pl}}{V_{sp}} = \frac{25543,56 + 0 + 0}{6,8027} = \mathbf{3754,8992 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}}$$

Pro vypočtenou hodnotu měrné entalpie i_{sp} byla určena na stejném principu jako u plyných paliv při respektování složení spalin adiabatická spalná teplota.

$$t_a = \mathbf{2204,95 \text{ } ^\circ\text{C}}$$

8.3.2 Výpočet teoretické spalné teploty pro dokonalé spalování

Součinitel přebytku vzduchu pro uhlí je stanoven dle zadání $n = 1$, teplota přehřátí uhlí $t_u = 90 \text{ } ^\circ\text{C}$, teplota přehřátí vzduchu $t_{vz} = 160 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Stanovení teoretické teploty probíhá dle rovnice (36), pro kterou je nutno určit objem vzniklých spalin.

Výpočet objemového spalování

Hodnoty objemového spalování uhlí pro teoretickou spalnou teplotu jsou totožné s hodnotami objemového spalování pro spalnou teplotu adiabatickou, protože se počítá se součinitelem přebytku vzduchu $n = 1$ (viz tab. 17)

Stanovení přehřátí uhlí

Stanovení měrné tepelné kapacity uhlí c_p a přehřátí uhlí $Q_{\text{uhlí}}$ [22]

$$Q_{\text{uhlí}} = m \cdot c_p \cdot t_{př} \quad (\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}) \quad (52)$$

$$Q_{\text{uhlí}} = 1 \cdot 1,1678 \cdot 90 = \mathbf{105,102 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}}$$

$$c_p = c_0 + k \cdot t_{př} \quad (\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}) \quad (53)$$

$$c_p = 1,13 + 0,00042 \cdot 90 = \mathbf{1,1678 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}}$$

Stanovení přehřátí vzduchu pro spalování uhlí dle rovnice (39)

$$Q_{vz} = L_{skut} \cdot i_{vz}^{t_{vz}} = 6,5557 \cdot 213,29 = \mathbf{1398,2976 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}}$$

Stanovení entalpie spalin dle rovnice (33)

$$i_{sp} = \frac{Q_i^{VL} + Q_{vz} + Q_{pl}}{V_{sp}} = \frac{25543,56 + 105,102 + 1398,2976}{6,8027} = \mathbf{3975,8989 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}}$$

Pro vypočtenou hodnotu měrné entalpie i_{sp} byla dle tabelárních hodnot při respektování složení vzniklých spalin určena teoretická spalná teplota [22].

$$t_t = \mathbf{2321,36 \text{ } ^\circ\text{C}}$$

8.3.3 Výpočet praktické spalné teploty pro dokonalé spalování

Praktická teplota uhlí se stanoví dle rovnice (40), pyrometrický efekt byl zvolen $\eta_{pyr} = 0,75$.

$$t_p = t_t \cdot \eta_{pyr} = 2321,36 \cdot 0,75 = \mathbf{1741,02 \text{ } ^\circ\text{C}}$$

Hodnoty všech tří vybraných spalných teplot uhlí jsou uvedeny v tabulce č. 24.

Tabulka 24. Porovnání spalných teplot uhlí

Spalná teplota	Značka	Hodnota	Jednotka
Adiabatická	t_a	2204,95	$^\circ\text{C}$
Teoretická	t_t	2321,36	$^\circ\text{C}$
Praktická	t_p	1741,02	$^\circ\text{C}$

8.3.4 Výpočet teoretické spalné teploty pro smíšené spalování

Výpočet této teploty koresponduje s výpočtem teplot v oblasti smíšeného spalování plynných paliv, viz kapitola 8.1 a 8.2. Pro vzorový výpočet byl zvolen součinitel přebytku vzduchu $n = 0,99$, přehřátí uhlí $t_u = 90 \text{ } ^\circ\text{C}$, teplota přehřátí vzduchu $t_{vz} = 160 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Výpočet objemového spalování uhlí pro vybranou hodnotu $n = 0,9$

Minimální množství kyslíku pro smíšené spalování je totožné s minimálním množstvím kyslíku pro dokonalého spalování (viz rovnice 25)

$$O_{min} = \mathbf{1,3746 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}}$$

Skutečné množství kyslíku pro $n = 0,9$

$$O_{skut} = O_{min} \cdot n = 1,3746 \cdot 0,9 = \mathbf{1,2371 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}}$$

Spotřeba kyslíku na dokonalé spálení vodíku:

$$O_{min}^H = 5,6 \cdot \frac{w_H}{100} \quad (\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}) \quad (54)$$

$$O_{min}^H = 5,6 \cdot \frac{w_H}{100} = 5,6 \cdot 0,0359 = \mathbf{0,2010 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}}$$

Spotřeba kyslíku na dokonalé spálení síry:

$$O_{min}^S = 0,7 \cdot \frac{w_C}{100} \quad (\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}) \quad (55)$$

$$O_{min}^S = 0,7 \cdot \frac{w_C}{100} = 0,7 \cdot 0,0046 = \mathbf{0,0032 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}}$$

Dispoziční množství kyslíku pro spálení uhlíku:

$$O_{disp}^C = O_{skut} - (O_{min}^H + O_{min}^S) \quad (56)$$

$$O_{disp}^C = 1,2371 - (0,2010 + 0,0032) = \mathbf{1,0347 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}}$$

Z výpočtu spalování je patrné, že tato část kyslíku nestačí pro dokonalé spálení přítomného uhlíku, a je tak opět potřeba na základě sestavené poměrové rovnice poměrově určit procento dokonale a procento nedokonale spáleného uhlíku v uhlí.

Poměrová rovnice:

$$0,933 \cdot C \cdot (1 - x) + 1,87 \cdot C \cdot x = O_{disp}^C$$

$$0,933 \cdot 0,6409 \cdot (1 - x) + 1,87 \cdot 0,6409 \cdot x = 1,0347$$

$$x = 0,7299$$

Množství C, které shoří dokonale:

$$0,6409 \text{ kg C} \cdot x = 0,6409 \cdot 0,7299 = 0,4678 \text{ kg C}$$

Množství C, které shoří nedokonale:

$$0,6409 \text{ kg C} \cdot x = 0,6409 \cdot 0,2701 = 0,1731 \text{ kg C}$$

Hodnoty chemického složení uhlí při úvaze smíšeného spalování jsou uvedeny v tabulce 25.

Tabulka 25 Složení uhlí při smíšeném spalování ($n = 0,9$)

Název prvku	Chemická značka	Množství	Jednotka
Uhlík (shoří dokonale)	C	46,78	%
Uhlík (shoří nedokonale)	C	17,31	%
Vodík	H	3,59	%
Dusík	N	0,94	%
Síra	S	0,46	%
Kyslík	O	3,72	%
Vlhkost	W	1,0	%
Popeloviny	A	26,2	%
Celkem	Σ	100	%

Výpočet spalování a stanovení objemu spalin a jejich složení probíhá podle objemového spalování.

Stanovení objemu oxidu uhličitého ve spalinách dle rovnice (47)

$$V_{CO_2} = 1,87 \cdot \frac{w_C}{100} = 1,87 \cdot 0,4678 = \mathbf{0,8748 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}}$$

Objem oxidu uhelnatého ve spalinách

$$V_{CO} = 1,87 \cdot 0,1731 = \mathbf{0,3233 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}}$$

Stanovení objemu spalin oxidu siřičitého dle rovnice (48)

$$V_{SO_2} = 0,7 \cdot \frac{w_S}{100} = 0,7 \cdot 0,0046 = \mathbf{0,0032 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}}$$

Objem vody ve spalinách dle rovnice (49)

$$V_{H_2O} = 11,2 \cdot \frac{w_H}{100} + 1,24 \cdot w = 11,2 \cdot 0,0359 + 1,24 \cdot 0,001 = \mathbf{0,4145 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}}$$

Objem dusíku ve spalinách dle rovnice (50)

$$V_{N_2} = 0,8 \cdot \frac{w_N}{100} + O_{min}^{0,9} \cdot n \cdot 3,76 = 0,8 \cdot 0,0094 + 1,2145 \cdot 0,9 \cdot 3,76$$

$$V_{N_2} = \mathbf{4,1195 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}}$$

kde: $O_{min}^{n=0,9}$ je množství kyslíku pro smíšené spalování

Celkový objem spalin dle rovnice (51)

$$V_{SP} = V_{CO_2} + V_{SO_2} + V_{H_2O} + V_{N_2} + O_2 \quad (\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1})$$

$$V_{SP} = 0,8748 + 0,0032 + 0,04144 + 4,1194 = \mathbf{5,7349 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}}$$

$$L_{skut} = O_{min}^{n=0,9} \cdot n \cdot \frac{100}{21} = 1,2145 \cdot 0,9 \cdot \frac{100}{21} = \mathbf{5,2049 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}}$$

Výsledky objemového spalování uhlí při přebytku vzduchu $n = 0,9$ jsou uvedeny v tabulce 26.

Tabulka 26 Objemové spalování uhlí při smíšeném spalování ($n = 0,9$)

Spalovací proces	Značka	Hodnota	Jednotka
Minimální množství kyslíku	O_{min}	1,3746	$\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$
Minimální množství kyslíku pro smíšené spalování	$O_{min}^{n=0,9}$	1,2145	$\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$
Skutečné množství spalovacího vzduchu	L_{skut}	5,2049	$\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$
Objem oxidu uhličitého ve spalinách	V_{CO_2}	0,8748	$\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$
Objem oxidu uhelnatého ve spalinách	V_{CO}	0,3233	$\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$
Objem oxidu siřičitého ve spalinách	V_{SO_2}	0,0032	$\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$
Objem vody ve spalinách	V_{H_2O}	0,4145	$\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$
Objem dusíku ve spalinách	V_{N_2}	4,1195	$\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$
Celkový objem spalin	V_{SP}	5,7349	$\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$

Stanovení přehřátí uhlí je stejné jako u výpočtu teoretické spalné teploty a činí:

Stanovení měrné tepelné kapacity uhlí c_p a přehřátí uhlí $Q_{uhlí}$ dle rovnice (52)

$$Q_{uhlí} = \mathbf{105,102 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}}$$

Stanovení přehřátí spalovacího vzduchu dle rovnice (39) je určeno při výpočtu teoretické spalné teploty a činí:

$$Q_{vz} = \mathbf{1110,19 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}}$$

Stanovení chemického nedopalu uhlí dle rovnice (43)

$$Q_{ch, ned} = V_{CO} \cdot Q_i^{CO} = 0,3230 \cdot 12640 = \mathbf{4083,1311 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}}$$

Stanovení entalpie spalin dle rovnice (44)

$$i_{sp} = \frac{Q_i^{VL} + Q_{vz} + Q_{pl} - Q_{ch, ned}}{V_{sp}} = \frac{25543,56 + 105,102 + 1110,19 - 4083,1311}{5,7349} = \mathbf{3953,9587 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}}$$

Pro vypočtenou hodnotu měrné entalpie i_{sp} byla určena teoretická spalná teplota.

$$t_t = \mathbf{2319,32 \text{ } ^\circ\text{C}}$$

8.3.5 Výpočet praktické spalné teploty pro smíšené spalování

Praktická spalná teplota uhlí se stanoví dle rovnice (40)

$$t_p = t_t \cdot \eta_{pyr} = 2319,32 \cdot 0,75 = \mathbf{1739,49\text{ }^{\circ}\text{C}}$$

Hodnoty spalných teplot smíšeného spalování uhlí jsou uvedeny v tabulce 27.

Tabulka 27. Porovnání spalných teplot uhlí u smíšeného spalování

Spalná teplota	Značka	Hodnota	Jednotka
Teoretická	t_t	2319,32	$^{\circ}\text{C}$
Praktická	t_p	1739,49	$^{\circ}\text{C}$

8.4 Výpočet spalování směsi uhlí a vysokopecního plynu

Pro výpočty byly zvoleny možnosti vytváření směsi paliv, kde převládající složkou bude uhlí doplněné vysokopecním plynem. Výpočet je proveden pro 2 varianty:

1. Uhlí bude využito v množství 85 procent a bude doplněno vysokopecním plynem do plného tepelného výkonu měrné jednotky uhlí.
2. Uhlí bude využito ze 70 procent a opět bude doplněno vysokopecním plynem do plného tepelného výkonu měrné jednotky paliva.

Ve výpočtu jsou použity výsledky z předchozích kapitol (8.1, 8.3), které řeší spalné teploty vysokopecního plynu a uhlí. Konkrétně se jedná o hodnoty výhřevnosti a výsledky spalování obou zúčastněných paliv (uhlí, vysokopecní plyn). Hodnota výhřevnosti uhlí $Q_i^{uhlí}$ je $25543,55\text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ a hodnota výhřevnosti VP $Q_i^{VP} = 2910,63\text{ kJ}\cdot\text{m}^{-3}$.

Pokud je obsahem uhlí ve směsi zajištěno 85 % výhřevnosti směsi, je třeba doplnit směs takovým objemem vysokopecního plynu, který nahradí 15 % výhřevnosti uhlí. Tomuto množství odpovídá objem vysokopecního plynu $1,3164\text{ m}^3$. Výpočet jeho hodnoty doplňujícího vysokopecního plynu:

$$V_{pl} = \frac{Q_i^u - 0,85 \cdot Q_i^u}{Q_i^{VP}} \quad (\text{m}^3) \quad (57)$$

$$V_{pl} = \frac{25543,56 - 0,85 \cdot 25543,56}{2910,63} = \mathbf{1,3164\text{ m}^3}$$

Spaliny, vzniklé z vytvořené směsi, budou součtem příslušné složky spalin v adekvátním poměru

Vzorový výpočet pro směs paliva u dokonalého i nedokonalého spalování uhlí a vysokopecního plynu je uveden v následujících kapitolách.

8.4.1 Výpočet teoretické spalné teploty směsi pro dokonalé spalování

Součinitel přebytku vzduchu pro uhlí je stanoveno $n = 1,0$, předehřátí uhlí $t_{pl} = 90\text{ °C}$, teplota předehřátí vzduchu $t_{vz} = 160\text{ °C}$. Složení směsi uhlí a vysokopecního plynu je zobrazeno v tabulce 28.

Tabulka 28 Složení směsi uhlí a vysokopecního plynu ($n = 1,0$)

Složky spalin	Složení spalin (100 % uhlí)	$V_i \cdot 85\%$ uhlí	Složení spalin (100 % VP)	$V_i \cdot 1,3164$ VP	Složení spalin směsi
V_{CO_2}	1,1985	1,0187	0,4024	0,5297	1,5484
V_{SO_2}	0,0032	0,0027	0,0	0,0	0,0027
V_{H_2O}	0,4415	0,3513	0,0610	0,0803	0,4326
V_{N_2}	5,1865	4,4085	0,9871	1,2994	5,7079
V_{SP}	6,8027	5,7823	1,4306	1,9095	7,6918

Stanovení předehřátí vzduchu a paliv pro směs 85 % uhlí a doplněno vysokopecním plynem, je v adekvátním poměru jako u výpočtu teoretické spalné teploty uhlí, resp. vysokopecního plynu, při respektování konkrétní hodnoty n .

Entalpie spalin směsi je dána výpočtem:

$$i_{sp}^{směsi} = \frac{0,85 \cdot Q_i^{uhlí} + 1,3164 \cdot Q_i^{VP} + 0,85 \cdot Q_{pr}^{uhlí} + 1,316 \cdot Q_{pr}^{VP} + 0,85 \cdot Q_{pr}^{vzd,uhlí} + 1,3164 \cdot Q_{pr}^{vzd,VP}}{V_{sp}^{směsi}} \quad (m^3) \quad (58)$$

$$i_{sp}^{směsi} = \frac{21712,026 + 3831,553 + 89,352 + 54,0187 + 1348,68}{7,6918} = \mathbf{3614,8620\text{ kJ}}$$

Pro vypočtenou hodnotu měrné entalpie i_{sp} byla určena teoretická spalná teplota.

$$t_t = \mathbf{2076,93\text{ °C}}$$

8.4.2 Výpočet praktické spalné teploty pro smíšené spalování

Praktická teplota směsi uhlí a vysokopecního plynu se stanoví dle rovnice (41)

$$t_p = t_t \cdot \eta_{pyr} = 2076,93 \cdot 0,75 = \mathbf{1557,69\text{ °C}}$$

Hodnoty spalných teplot sledované směsi jsou uvedeny v tabulce č. 29.

Tabulka 29 Porovnání spalných teplot u směsi 85 % uhlí s vysokopecním plynem

Spalná teplota	Značka	Hodnota	Jednotka
Teoretická	t_t	2076,93	°C
Praktická	t_p	1557,69	°C

8.4.3 Výpočet teoretické spalné teploty směsi pro nedokonalé spalování

Součinitel přebytku vzduchu pro uhlí je zvolen $n = 0,9$, předehřátí uhlí $t_{pi} = 90\text{ °C}$, teplota předehřátí vzduchu $t_{vz} = 160\text{ °C}$.

Složení spalin směsi (85 % uhlí) při tomto spalování vychází z tabulky 10 (spaliny vysokopečního plynu, $n = 0,9$) a z tabulky 23 (spaliny uhlí, $n = 0,9$). Pro přehled je výpočet proveden v tabulce 30.

Tabulka 30 Složení směsi uhlí a vysokopečního plynu ($n = 0,9$)

Složky spalin	Složení spalin (100 % uhlí)	$V_i \cdot 85\%$ uhlí	Složení spalin (100 % VP)	$V_i \cdot 15\%$ VP	Složení spalin směsi
V_{CO_2}	0,8748	0,7436	0,3784	0,4981	1,2417
V_{CO}	0,3230	0,2746	0,0239	0,0314	0,3060
V_{SO_2}	0,0032	0,0027	0,0	0,0	0,0027
V_{H_2O}	0,4415	0,3513	0,0610	0,0803	0,4326
V_{N_2}	4,1190	4,6879	0,9015	1,1867	4,6879
V_{SP}	5,7349	4,8746	1,3649	1,7967	6,6713

Entalpie spalin směsi je dána výpočtem dle rovnice (60)

$$i_{sp}^{směsi} = \frac{0,85 \cdot Q_i^{uhlí} + 1,3164 \cdot Q_i^{VP} + 0,85 \cdot Q_{pi}^{uhlí} + 1,316 \cdot Q_{pi}^{VP} + 0,85 \cdot Q_{pi}^{vzd,uhlí} + 1,3164 \cdot Q_{pi}^{vzd,VP} - Q_{ch, ned}}{V_{sp}^{směsi}}$$

$$i_{sp}^{směsi} = \frac{21712,026 + 3831,553 + 89,352 + 54,0187 + 1087,7840 - 3867,84}{6,671} = \mathbf{3433,66\text{ kJ}}$$

Tato teplota odpovídá teoretické spalné teplotě:

$$t_t = \mathbf{2017,511\text{ °C}}$$

8.4.4 Výpočet praktické spalné teploty pro smíšené spalování

Praktická teplota uhlí se stanoví dle rovnice (48)

$$t_p = t_t \cdot \eta_{pyr} = 2017,51 \cdot 0,75 = \mathbf{1518,13\text{ °C}}$$

Hodnoty spalných teplot sledované směsi jsou uvedeny v tabulce 31.

Tabulka 31 Porovnání spalných teplot u směsi uhlí s vysokopečním plynem

Spalná teplota	Značka	Hodnota	Jednotka
Teoretická	t_t	2017,51	°C
Praktická	t_p	1518,47	°C

9. VYHODNOCENÍ VÝPOČTŮ

V předchozí kapitole byly vypočteny ke každému vybranému palivu 3 spalné teploty. Jedná se o spalné teploty: adiabatickou, teoretickou a praktickou, přičemž všechny 3 spalné teploty byly stanoveny při dokonalém spalování. Teplota teoretická a praktická byla stanovena i při spalování nedokonalém.

Vybraná paliva pro výpočet spalných teplot a jejich základní parametry:

- Vysokopecní plyn je 100 % vlhký, teplota předehřátí vzduchu je nastavena na 160 °C, teplota plynu je 30 °C.
- Koksárenský plyn je 100 % vlhký, teplota předehřátí vzduchu je nastavena na 160 °C, teplota plynu je 15 °C.
- Vlhkost uhlí je 1 %, předehřátí vzduchu je opět 160 °C, teplota uhlí je 90 °C.
- 85 % uhlí, doplněné vysokopecním plynem, podmínky předehřevu jsou totožné jako u zúčastněných paliv
- 70 % uhlí, doplněné vysokopecním plynem, podmínky předehřevu jsou totožné jako u zúčastněných paliv

Pyrometrický efekt, u všech tří paliv, má hodnotu $\eta_{\text{pyr}} = 0,75$.

Výsledkem této kapitoly je vyhodnocení výpočtů uvedených paliv pro různé hodnoty součinitele přebytku vzduchu v rozmezí 0,8 až 1,2.

Grafická závislost je stanovena pro součinitel přebytku vzduchu v rozmezí $n = 0,8$ až 1,2. V oblasti $n \geq 1$ probíhá dokonalé spalování paliva a v oblasti $n < 1$ probíhá spalování paliva smíšené.

Přebytek spalovacího vzduchu se projevuje ztrátou chemického tepla. Zbytečně velký přebytek vzduchu zvyšuje objem spalin, které odnáší více tepla z prostoru pece. U nedokonalého spalování s ubývajícím přebytkem vzduchu klesá teplota v prostoru pece, protože se zvyšuje chemické nedopal $Q_{\text{Ch,ned}}$.

9.1 Vysokopecní plyn

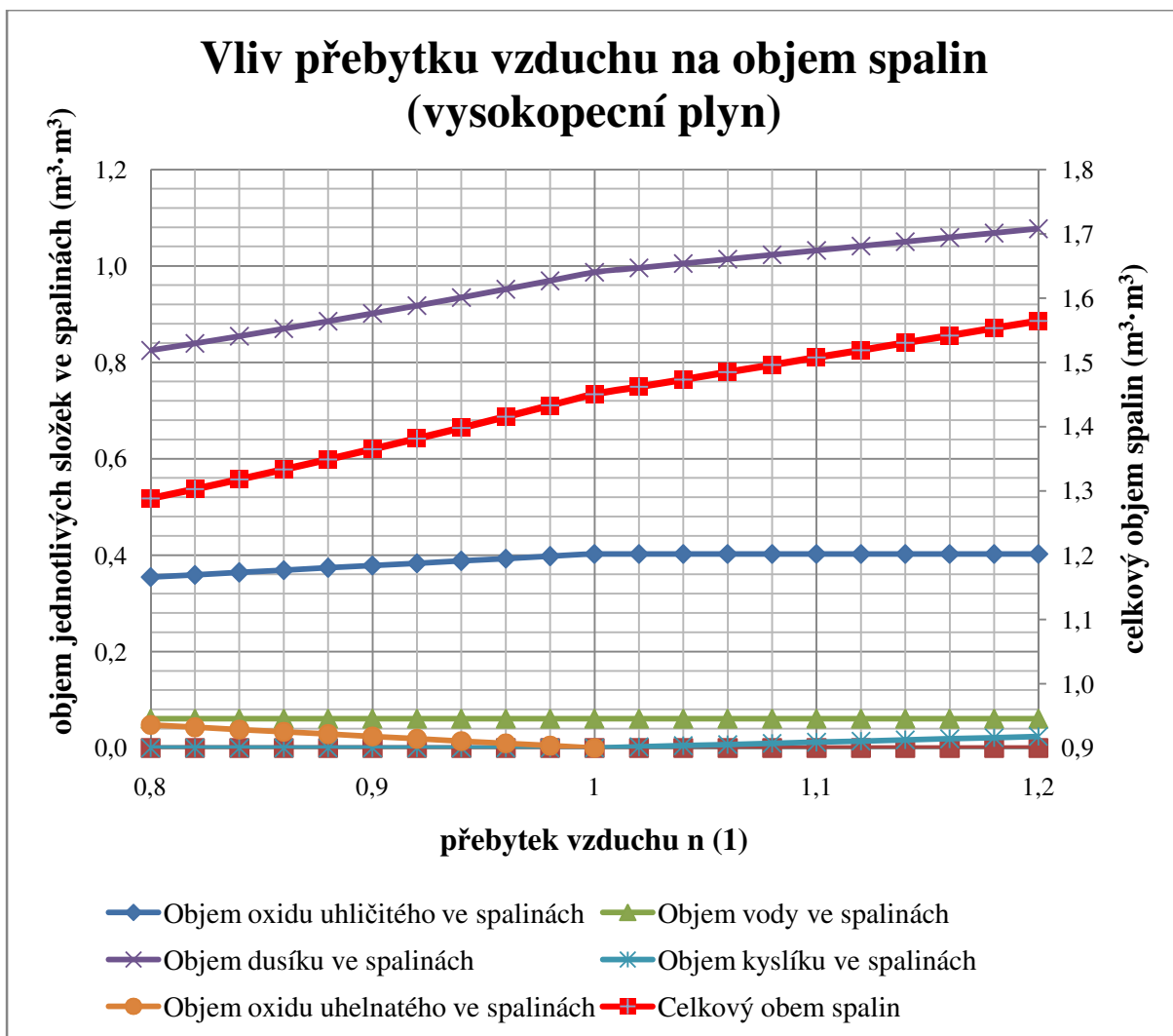
Vysokopecní plyn je 100 % vlhký, teplota přehřátí vzduchu je nastavena na 160 °C, teplota plynu je 30 °C. Chemické složení vlhkého vysokopecního plynu (viz tabulka. 5).

Výsledky jednotlivých složek objemového spalování vysokopecního plynu a nedopalu jsou v závislosti na přebytku vzduchu graficky sestaveny v obrázku 8. Podklady pro tyto grafické závislosti jsou souhrnně uvedeny v tabulce 32.

Tabulka 32. Výsledky spalování u vysokopecního plynu

Přbytek vzduchu	V_{CO_2} $m^3 \cdot m^{-3}$	V_{SO_2} $m^3 \cdot m^{-3}$	V_{H_2O} $m^3 \cdot m^{-3}$	V_{N_2} $m^3 \cdot m^{-3}$	V_{O_2} $m^3 \cdot m^{-3}$	V_{CO} $m^3 \cdot m^{-3}$	V_{SP} $m^3 \cdot m^{-3}$	$Q_{Ch, ned}$ $m^3 \cdot m^{-3}$
0,80	0,3545	0,0000	0,0610	0,8249	0,0000	0,0479	1,2884	605,5474
0,82	0,3593	0,0000	0,0610	0,8395	0,0000	0,0431	1,3030	544,9926
0,84	0,3641	0,0000	0,0610	0,8545	0,0000	0,0383	1,3179	484,4379
0,86	0,3689	0,0000	0,0610	0,8698	0,0000	0,0335	1,3332	423,8832
0,88	0,3737	0,0000	0,0610	0,8855	0,0000	0,0287	1,3489	363,3284
0,90	0,3785	0,0000	0,0610	0,9015	0,0000	0,0240	1,3650	302,7737
0,92	0,3833	0,0000	0,0610	0,9179	0,0000	0,0192	1,3814	242,2190
0,94	0,3880	0,0000	0,0610	0,9347	0,0000	0,0144	1,3981	181,6642
0,96	0,3928	0,0000	0,0610	0,9518	0,0000	0,0096	1,4152	121,1095
0,98	0,3976	0,0000	0,0610	0,9693	0,0000	0,0048	1,4327	60,5547
1,00	0,4024	0,0000	0,0610	0,9871	0,0000	0,0000	1,4506	0,0000
1,02	0,4024	0,0000	0,0610	0,9961	0,0024	0,0000	1,4620	0,0000
1,04	0,4024	0,0000	0,0610	1,0051	0,0048	0,0000	1,4734	0,0000
1,05	0,4024	0,0000	0,0610	1,0096	0,0059	0,0000	1,4791	0,0000
1,06	0,4024	0,0000	0,0610	1,0142	0,0072	0,0000	1,4848	0,0000
1,08	0,4024	0,0000	0,0610	1,0232	0,0096	0,0000	1,4962	0,0000
1,10	0,4024	0,0000	0,0610	1,0322	0,0120	0,0000	1,5076	0,0000
1,12	0,4024	0,0000	0,0610	1,0412	0,0144	0,0000	1,5190	0,0000
1,14	0,4024	0,0000	0,0610	1,0502	0,0168	0,0000	1,5304	0,0000
1,16	0,4024	0,0000	0,0610	1,0592	0,0192	0,0000	1,5418	0,0000
1,18	0,4024	0,0000	0,0610	1,0682	0,0216	0,0000	1,5532	0,0000
1,20	0,4024	0,0000	0,0610	1,0772	0,0240	0,0000	1,5646	0,0000

Grafický výstup objemu jednotlivých složek ve spalínách vysokopecního plynu je znázorněn v obr. 8.



Obr. 8. Výsledky objemového spalování vysokopecního plynu

Popis jednotlivých složek spalin koksárenského plynu (viz tab. 32 a obr. 8):

Objem oxidu uhličitého ve spalinách (CO_2) lineárně stoupá s přibývajícím součinitelem přestupu vzduchu do hodnoty $n = 1$. Od tohoto bodu je CO_2 ve spalinách konstantní.

Objem vody ve spalinách (H_2O) se nemění v celém průběhu spalování.

Objem kyslíku ve spalinách (O_2) vzniká pouze v oblasti dokonalého spalování a lineárně narůstá se zvyšujícím součinitelem přebytku vzduchu.

Objem dusíku ve spalinách (N_2) stoupá s přibývajícím přebytkem spalovacího vzduchu.

Objem oxidu uhelnatého ve spalinách (CO) vzniká pouze v oblasti nedokonalého spalování a klesá s přibývajícím přebytkem vzduchu.

Celkový objem spalin (V_{SP}) je součet objemů jednotlivých složek ve spalinách a narůstá s přibývajícím přebytkem vzduchu.

9.2 Koksárenský plyn

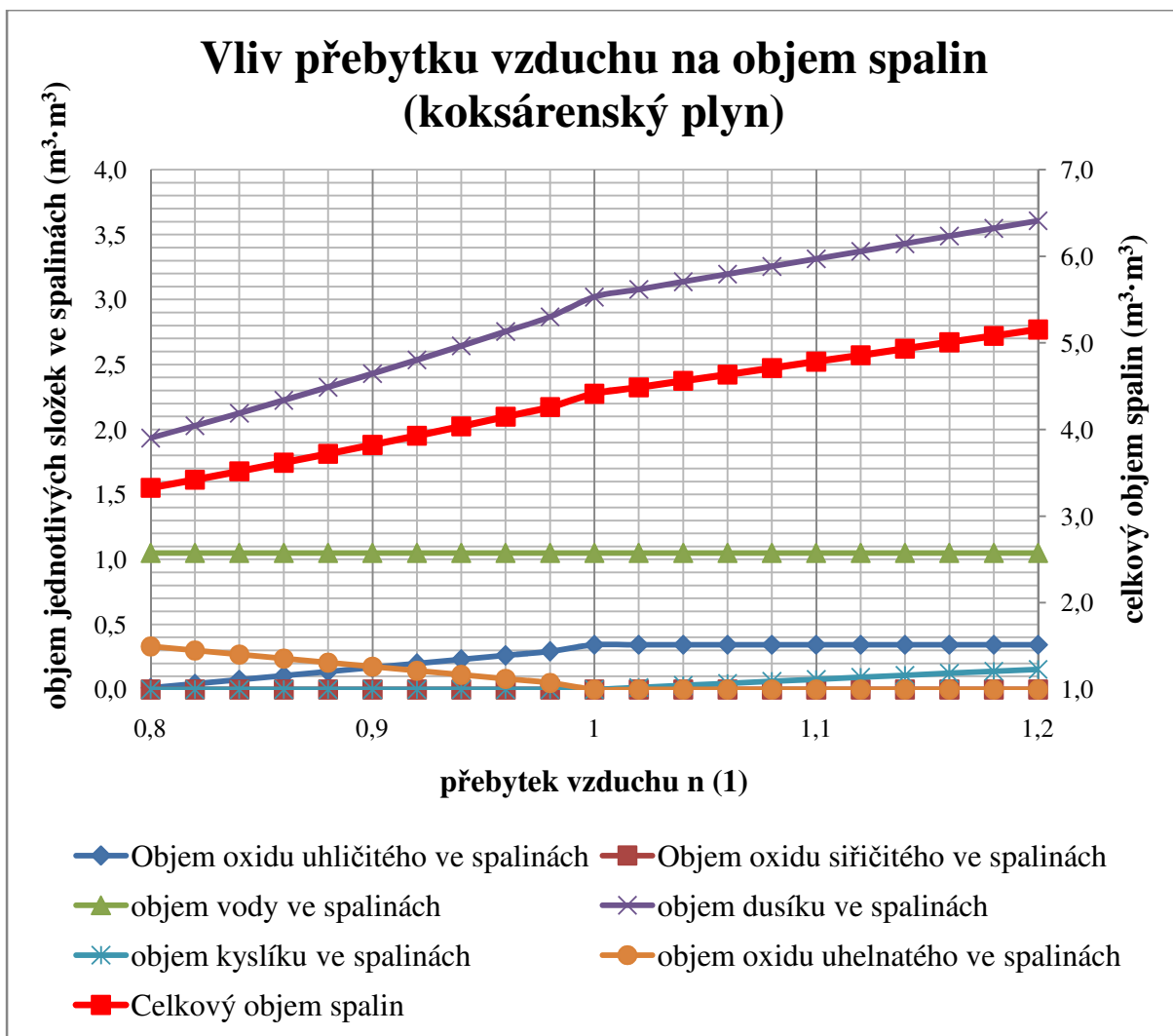
Koksárenský plyn je 100 % vlhký, teplota předeřhřátí vzduchu je nastavena na 160 °C, teplota plynu je 15 °C. Chemické složení vlhkého koksárenského plynu (viz. tabulka. 14).

Výsledky jednotlivých složek objemového spalování koksárenského plynu a nedopalu jsou v závislosti na přebytku vzduchu graficky sestaveny v obrázku 9. Podklady pro tyto grafické závislosti jsou souhrnně uvedeny v tabulce 33.

Tabulka 33. Výsledky spalování u koksárenského plynu

Přbytek vzduchu	V_{CO_2} $m^3 \cdot m^{-3}$	V_{SO_2} $m^3 \cdot m^{-3}$	V_{H_2O} $m^3 \cdot m^{-3}$	V_{N_2} $m^3 \cdot m^{-3}$	V_{O_2} $m^3 \cdot m^{-3}$	V_{CO} $m^3 \cdot m^{-3}$	V_{SP} $m^3 \cdot m^{-3}$	$Q_{Ch, ned}$ $kJ \cdot m^{-3}$
0,80	0,0128	0,0000	1,0492	1,9348	0,0000	0,3313	3,3281	4188,0442
0,82	0,0439	0,0000	1,0492	2,0291	0,0000	0,3002	3,4224	3794,0947
0,84	0,0751	0,0000	1,0492	2,1257	0,0000	0,2690	3,5189	3400,1451
0,86	0,1063	0,0000	1,0492	2,2246	0,0000	0,2378	3,6178	3006,1955
0,88	0,1374	0,0000	1,0492	2,3258	0,0000	0,2067	3,7191	2612,2460
0,90	0,1686	0,0000	1,0492	2,4294	0,0000	0,1755	3,8227	2218,2964
0,92	0,1998	0,0000	1,0492	2,5354	0,0000	0,1443	3,9287	1824,3469
0,94	0,2309	0,0000	1,0492	2,6437	0,0000	0,1132	4,0370	1430,3973
0,96	0,2621	0,0000	1,0492	2,7543	0,0000	0,0820	4,1476	1036,4477
0,98	0,2933	0,0000	1,0492	2,8673	0,0000	0,0508	4,2606	560,5469
1,00	0,3441	0,0000	1,0492	3,0197	0,0000	0,0000	4,4129	0,0000
1,02	0,3441	0,0000	1,0492	3,0783	0,0156	0,0000	4,4871	0,0000
1,04	0,3441	0,0000	1,0492	3,1369	0,0312	0,0000	4,5613	0,0000
1,06	0,3441	0,0000	1,0492	3,1955	0,0468	0,0000	4,6356	0,0000
1,08	0,3441	0,0000	1,0492	3,2542	0,0623	0,0000	4,7098	0,0000
1,10	0,3441	0,0000	1,0492	3,3128	0,0779	0,0000	4,7840	0,0000
1,12	0,3441	0,0000	1,0492	3,3714	0,0935	0,0000	4,8582	0,0000
1,14	0,3441	0,0000	1,0492	3,4300	0,1091	0,0000	4,9324	0,0000
1,16	0,3441	0,0000	1,0492	3,4886	0,1247	0,0000	5,0066	0,0000
1,18	0,3441	0,0000	1,0492	3,5473	0,1403	0,0000	5,0808	0,0000
1,20	0,3441	0,0000	1,0492	3,6059	0,1558	0,0000	5,1550	0,0000

Grafický výstup objemu jednotlivých složek ve spalínách koksárenského plynu je znázorněn v obr. 9.



Obr. 9 Výsledky objemového spalování koksárenského plynu

Popis jednotlivých složek spalin koksárenského plynu (viz tab. 33 a obr. 9):

Objem oxidu uhličitého ve spalinách (CO_2) lineárně stoupá s přibývajícím součinitelem přestupu vzduchu do hodnoty $n = 1$. Od tohoto bodu je CO_2 ve spalinách konstantní.

Objem vody ve spalinách (H_2O) se nemění v celém průběhu spalování.

Objem kyslíku ve spalinách (O_2) vzniká pouze v oblasti dokonalého spalování a lineárně narůstá se zvyšujícím součinitelem přebytku vzduchu.

Objem dusíku ve spalinách (N_2) stoupá s přibývajícím přebytkem spalovacího vzduchu.

Objem oxidu uhelnatého ve spalinách (CO) vzniká pouze v oblasti nedokonalého spalování a klesá s přibývajícím přebytkem vzduchu.

Celkový objem spalin (V_{sp}) je součet objemů jednotlivých složek ve spalinách a narůstá s přibývajícím přebytkem vzduchu.

9.3 Uhlí

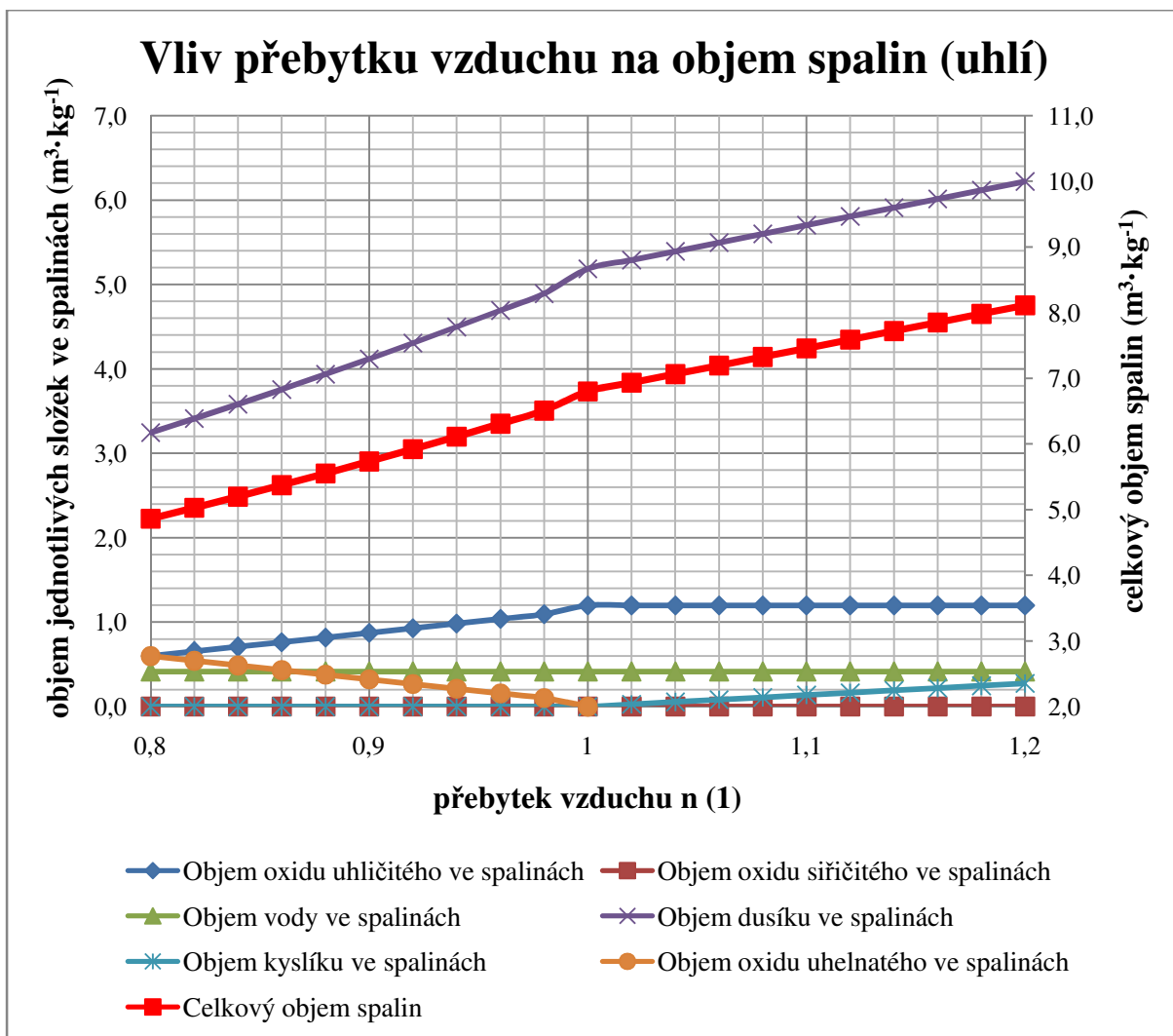
Vlhkost uhlí je 1 %, předeřtí vzduchu je opět 160 °C, teplota uhlí je 90 °C. Chemické složení uhlí je znázorněno v tabulce č. 21.

Výsledky jednotlivých složek objemového spalování uhlí jsou uvedeny v tabulce 34.

Tabulka 34. Výsledky spalování uhlí.

Přebytek vzduchu	V_{CO_2} $m^3 \cdot kg$	V_{SO_2} $m^3 \cdot kg$	V_{H_2O} $m^3 \cdot kg$	V_{N_2} $m^3 \cdot kg$	V_{O_2} $m^3 \cdot kg$	V_{CO} $m^3 \cdot kg$	V_{SP} $m^3 \cdot kg$	$Q_{Ch, ned}$ $kJ \cdot kg^{-1}$
0,80	0,5989	0,0032	0,4145	3,2466	0,0000	0,5983	4,8615	7562,1933
0,82	0,6541	0,0032	0,4145	3,4129	0,0000	0,5432	5,0279	6866,3809
0,84	0,7093	0,0032	0,4145	3,5833	0,0000	0,4882	5,1984	6170,5684
0,86	0,7644	0,0032	0,4145	3,7578	0,0000	0,4331	5,3731	5474,7560
0,88	0,8196	0,0032	0,4145	3,9366	0,0000	0,3781	5,5519	4778,9435
0,90	0,8748	0,0032	0,4145	4,1195	0,0000	0,3230	5,7349	4083,1311
0,92	0,9299	0,0032	0,4145	4,3065	0,0000	0,2680	5,9221	3387,3187
0,94	0,9851	0,0032	0,4145	4,4977	0,0000	0,2129	6,1134	2691,5062
0,96	1,0403	0,0032	0,4145	4,6931	0,0000	0,1579	6,3089	1950,2541
0,98	1,0954	0,0032	0,4145	4,8926	0,0000	0,1028	6,5085	1100,3684
1,00	1,1985	0,0032	0,4145	5,1865	0,5983	0,0000	6,8027	0,0000
1,02	1,1985	0,0032	0,4145	5,2901	0,0275	0,0000	6,9338	0,0000
1,04	1,1985	0,0032	0,4145	5,3937	0,0551	0,0000	7,0650	0,0000
1,06	1,1985	0,0032	0,4145	5,4973	0,0826	0,0000	7,1961	0,0000
1,08	1,1985	0,0032	0,4145	5,6009	0,1101	0,0000	7,3272	0,0000
1,10	1,1985	0,0032	0,4145	5,7044	0,1377	0,0000	7,4583	0,0000
1,12	1,1985	0,0032	0,4145	5,8080	0,1652	0,0000	7,5894	0,0000
1,14	1,1985	0,0032	0,4145	5,9116	0,1927	0,0000	7,7205	0,0000
1,16	1,1985	0,0032	0,4145	6,0152	0,2203	0,0000	7,8516	0,0000
1,18	1,1985	0,0032	0,4145	6,1188	0,2478	0,0000	7,9828	0,0000
1,20	1,1985	0,0032	0,4145	6,2224	0,2753	0,0000	8,1139	0,0000

Grafický výstup objemu jednotlivých složek ve spalínách uhlí je znázorněn v obr. 10.



Obr. 10 Výsledky objemového spalování uhlí

Popis jednotlivých složek spalin uhlí (viz tab. 34 a obr. 10):

Objem oxidu uhličitého ve spalinách (CO_2) lineárně stoupá s přibývajícím součinitelem přestupu vzduchu do hodnoty $n = 1$. Od tohoto bodu je CO_2 ve spalinách konstantní.

Objem vody ve spalinách (H_2O) se nemění v celém průběhu spalování.

Objem kyslíku ve spalinách (O_2) vzniká pouze v oblasti dokonalého spalování a lineárně narůstá se zvyšujícím součinitelem přebytku vzduchu.

Objem oxidu siřičitého (SO_2) nemění se v celém průběhu spalování.

Objem dusíku ve spalinách (N_2) stoupá s přibývajícím přebytkem spalovacího vzduchu.

Objem oxidu uhelnatého ve spalinách (CO) vzniká pouze v oblasti nedokonalého spalování a klesá s přibývajícím přebytkem vzduchu.

Celkový objem spalin (V_{SP}) je součet objemů jednotlivých složek ve spalinách a narůstá s přibývajícím přebytkem vzduchu.

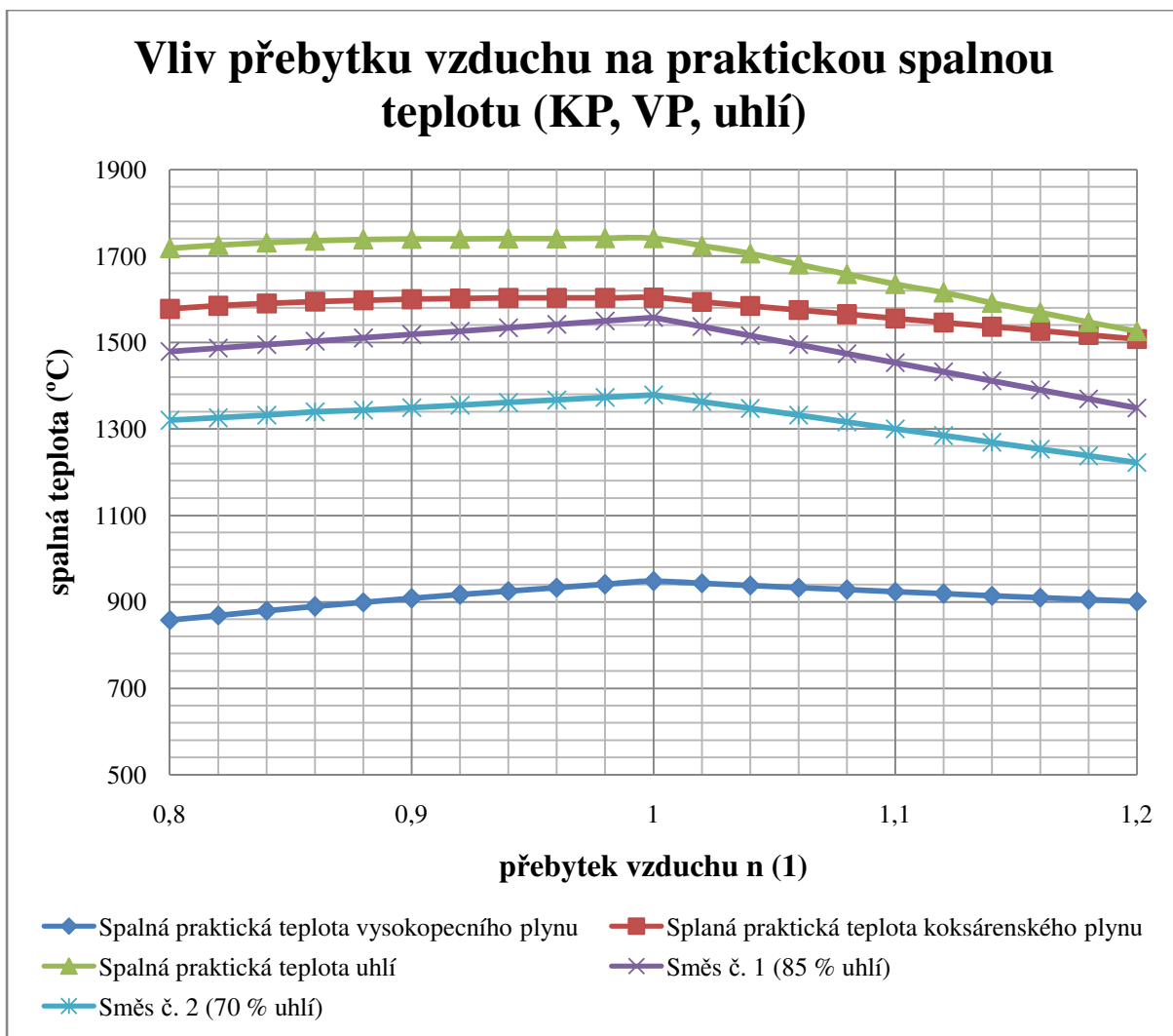
9.4 Zhodnocení vybraných paliv

Cílem diplomové práce bylo stanovení závislosti spalné teploty vybraných paliv na přebytku vzduchu. Z výpočtů vyplývá (viz. tabulka č. 35.), že nejvyšší spalná teplota je v hodnotě, kde se součinitel přebytku vzduchu rovná 1.

Tabulka 35. Praktické spalné teploty vybraných paliv

Přbytek vzduchu	Teplota (VP) (°C)	Teplota (KP) (°C)	Teplota (uhlí) (°C)	Teplota směsi č.1 (85% uhlí) (°C)	Teplota směsi č.1 (85% uhlí) (°C)
0,80	858,0934	1577,7459	1717,7225	1479,2520	1319,9936
0,82	868,9272	1584,8427	1725,1039	1487,0964	1325,8768
0,84	879,3348	1590,4631	1730,8498	1494,9408	1331,7601
0,86	889,3236	1594,5086	1735,0762	1502,7851	1339,6045
0,88	898,9081	1597,7156	1737,9169	1510,6295	1343,5267
0,90	908,0269	1600,1480	1739,4956	1518,1339	1349,4100
0,92	916,7530	1601,8654	1739,8002	1526,3183	1355,2933
0,94	925,0943	1602,9230	1740,1048	1534,1626	1361,1765
0,96	933,0840	1603,3722	1740,4095	1542,0070	1367,0598
0,98	940,6382	1603,2605	1740,7141	1549,8514	1372,9431
1,00	947,8346	1603,6981	1741,0187	1557,6958	1378,8264
1,02	942,8725	1593,5638	1723,7441	1536,7953	1363,1512
1,04	937,9748	1583,0207	1705,9855	1515,8948	1347,4760
1,05	935,5424	1577,3961	1693,0399	1494,9943	1331,8008
1,06	933,1402	1571,7713	1680,0944	1474,0938	1316,1256
1,08	928,3676	1560,0956	1658,0231	1453,1934	1300,4504
1,10	923,5777	1549,0464	1635,2763	1432,2929	1284,7752
1,12	918,8992	1540,3911	1615,2315	1411,3924	1269,1000
1,14	914,2795	1531,9629	1591,7866	1390,4919	1253,4248
1,16	909,7174	1523,7528	1569,1356	1369,5914	1237,7496
1,18	905,2120	1515,7526	1547,2465	1348,6910	1222,0744

Grafický výstup vybraných praktických spalných teplot v závislosti na přebytku vzduchu je znázorněn na obr. 11.

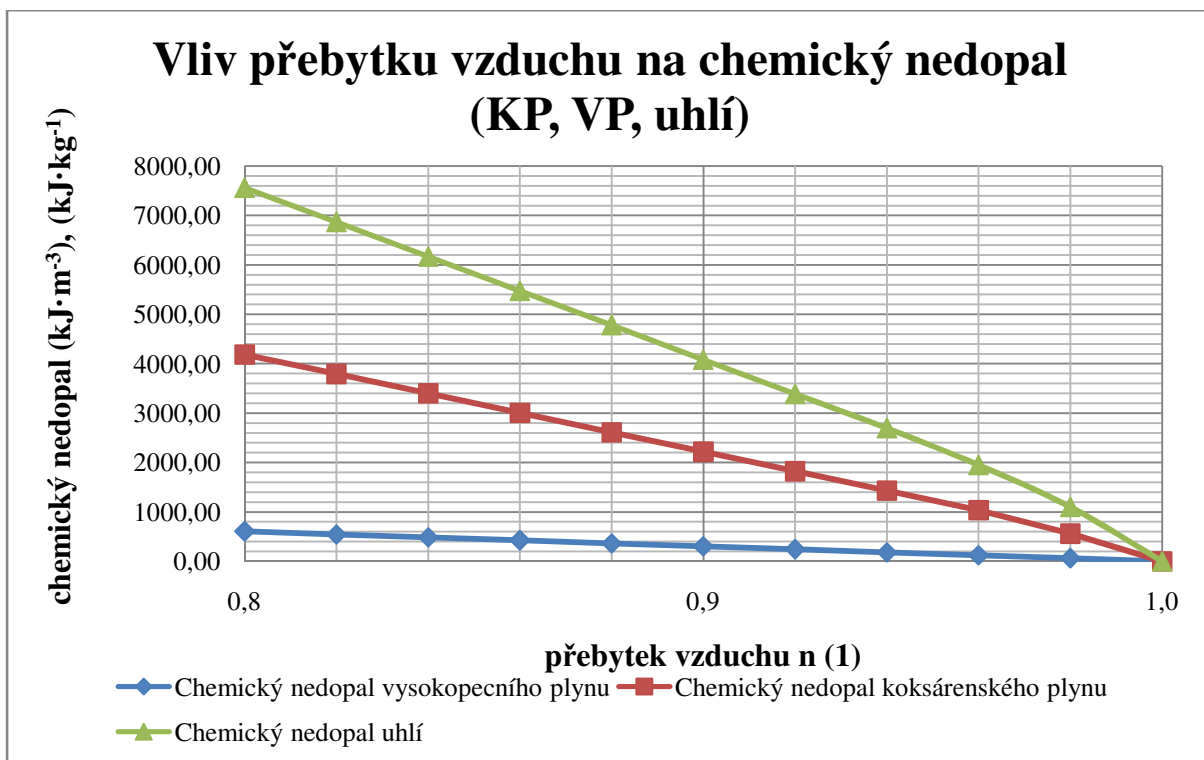


Obr. 11. Praktické spalné teploty vybraných paliv a směsí

Z obr. 11 vyplývá, že nejvyšší spalné teploty dosahuje uhlí, naopak nejnižší dosahuje vysokopečný plyn. Výsledné hodnoty praktických spalných teplot jsou uvedeny v tabulce 35.

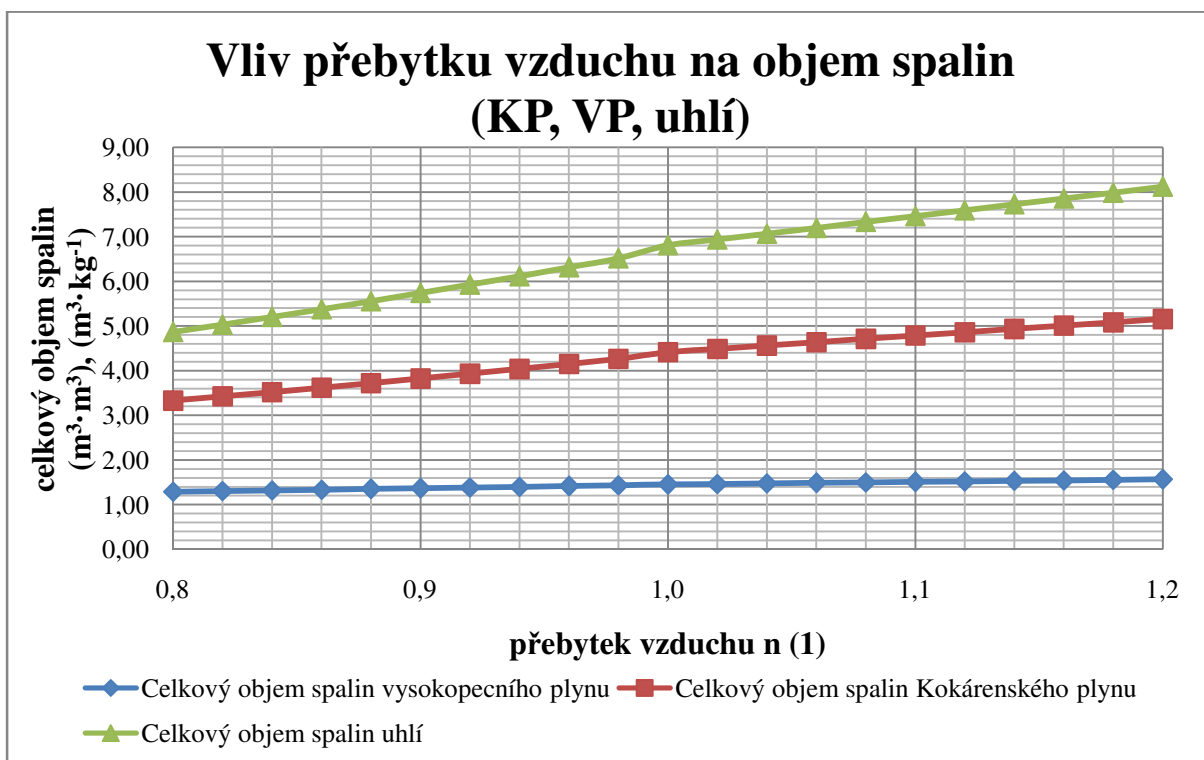
V oblasti nedokonalého spalování vzniká v palivu chemický nedopal. Se snižujícím přebytkem vzduchu klesá, protože se jeho velikost mění s objemem oxidu uhelnatého ve spalinách. Oxid uhelnatý také vzniká pouze v části nedokonalého spalování a stoupá se snižujícím se přebytkem vzduchu.

Ze směsi uhlí s vysokopečným plynem vyplývá, že s ubývajícím procentuálním množstvím uhlí se snižuje celková spalná teplota paliva.



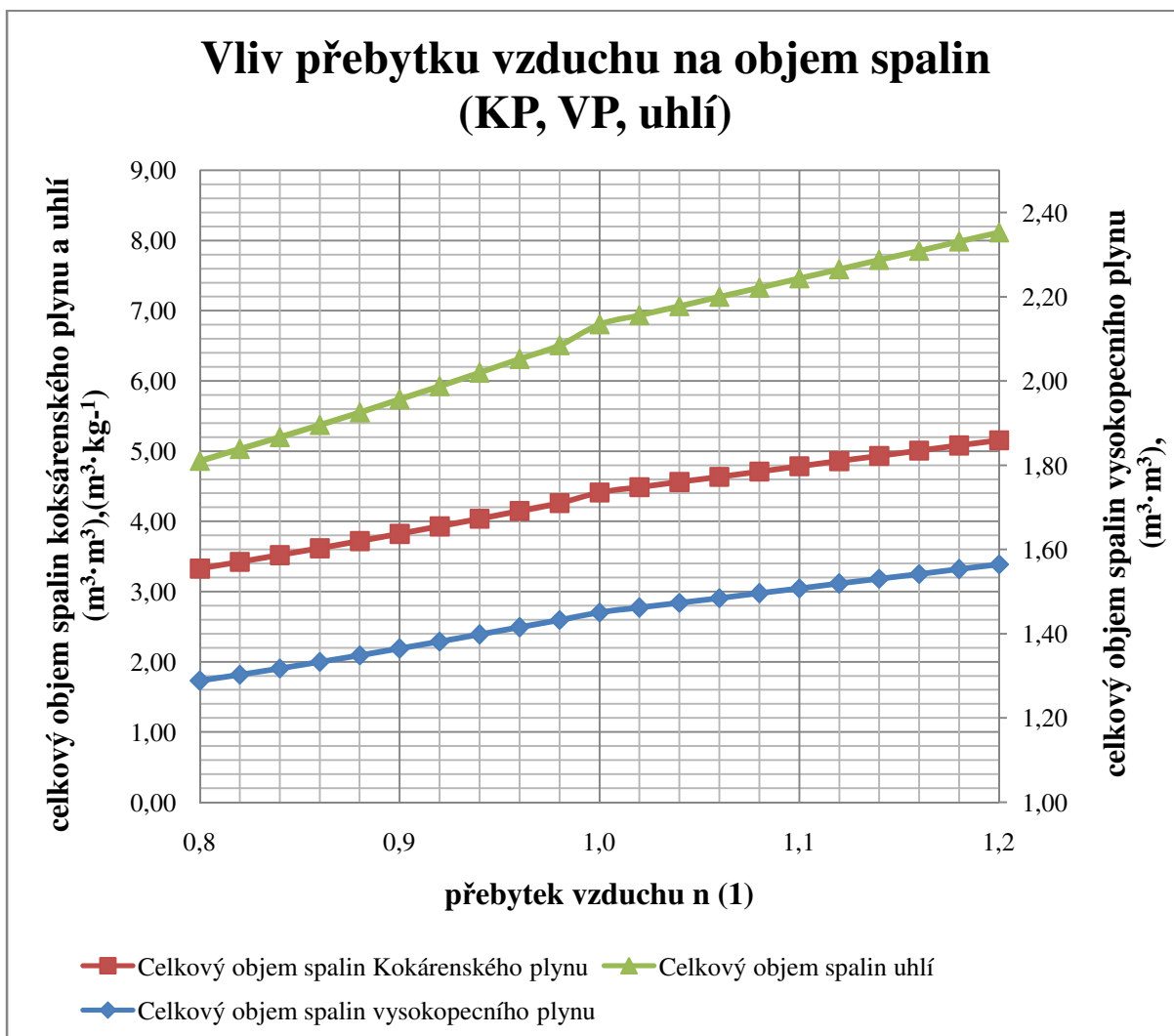
Obr. 12 Chemický nedopal vybraných paliv

Chemický nedopal klesá až do hodnoty součinitele přebytku vzduchu $n = 1$. V této hodnotě je nulový, protože v oblasti dokonalého spalování nevzniká. Výsledky chemického nedopalu jsou znázorněny v tabulkách 32,33,34.



Obr. 13 Celkový objem spalin vybraných paliv (a)

Z obrázku 13 vyplývá, že celkový objem spalin je nejvyšší u uhlí. Naopak nejnižší je u vysokopecního plynu.



Obr. 14 Celkový objem spalin vybraných paliv (b)

Obrázky 13 a 14 jsou z hlediska množství celkového objemu spalin vybraných paliv totožné. Liší se pouze přidanou vedlejší osou a to z důvodu, že na obrázku 13 vypadá celkový objem spalin vysokopecního plynu konstantní.

Z výsledků diplomové práce lze konstatovat, že s přibývajícím přebytkem vzduchu, v oblasti nedokonalého spalování, stoupá spalná teplota všech vybraných paliv. V oblasti dokonalého spalování naopak spalná teplota s přibývajícím součinitelem přebytku vzduchu klesá.

Ze všech vybraných paliv (VP, KP, uhlí) dosahuje nejvyšší spalné teploty uhlí. Má ovšem nejvyšší objem spalin a tím i nejvyšší chemický nedopal paliva.

10. ZÁVĚR

Po průmyslových podnicích je požadováno snížení emisní zátěže. Elektrárenské kotle pracující na tuhá paliva, případně plynná paliva, nebo směsi paliv, v průběhu svého pracovního procesu uvolňují do ovzduší škodlivé látky, mimo jiné i oxidy dusíku, které mají negativní dopady na životní prostředí, viz kapitola 2 a 3 v předkládané diplomové práci.

Snížování množství emitovaných škodlivin do ovzduší je možné buď zařazením detoxikační jednotky, nebo úpravou provozované technologie. Pro případ snížování emisí NO_x je zařazení detoxikační jednotky nákladné a ekonomicky méně výhodné, a proto je upřednostňována snaha upravit spalovací proces. Konkrétními metodami omezování tvorby NO_x při použití tuhého paliva a provozních plynů (KP, VP) na zařízení kotle K9 v TAMEH Czech s.r.o. se zabývá kapitola 5.

Vlastní náplní diplomové práce je posouzení úpravy spalování změnou množství přidávaného spalovacího vzduchu v rozsahu 0,8 až 1,2 k vybraným palivům. Množství spalovacího vzduchu má vliv na objem vzniklých spalin, případně tvorbu chemického nedopalu. Tyto faktory mají vliv na výslednou spalnou teplotu, od které se mimo jiné odvíjí i množství produkovaných NO_x .

Dle provedených propočtů dosahuje nejvyšší spalné praktické teploty uhlí, následuje koksárenský plyn, směs 85% uhlí doplněného vysokopecním plynem a pak následuje směs 70% uhlí doplněného vysokopecním plynem. Nejnižší praktické teploty jsou u vysokopecního plynu. Závislost těchto teplot na součiniteli přebytku vzduchu je zachycena v diplomové práci na obrázku 11.

Vzhledem k požadovaným emisním limitům je na provozovateli, zda se rozhodne pro úpravu spalovacího procesu nebo pro instalaci denitrifikační jednotky. Úpravou spalovacího procesu však může snížení tvorby NO_x pozitivně ovlivnit.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] STREBLOVÁ, Eva. *Souhrnné texty z chemie*. 2. dotisk. Praha: Karolinum, 2012. ISBN 978-80-246-2135-7.
- [2] Open chemistry database, Pubchem, [online]. 2016 [cit. 2016-03-16]. Dostupné z: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pccompound>
- [3] conVERTER [online]. 2002. [cit. 28.3.2016]. ISSN 1214-759. Dostupné z: <http://www.converter.cz/tabulky/hustota-plynu.htm>
- [4] TZBinfo [online]. 1999 [cit. 2016-04-11]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/2294-emise-z-kotelen-a-ochrana-ovzdusi-i>
- [5] Oxidy dusíku (NO_x/NO₂) [online]. [cit. 2016-05-11]. Dostupné z: http://www.irz.cz/repository/latky/oxidy_dusiku.pdf
- [6] European Environmental Agency EEA, Nitrogen oxides (NO_x) emissions [online]. 29.1.2014 [Cit. 1.4.2014]. Dostupné z: <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/eea-32-nitrogen-oxides-nox-emissions-1/assessment.2010-08-19.0140149032-3>
- [7] HOLOUBEK, Dušan. *Spal'ovacie zariadenia, výmenníky tepla a kotly*. Košice: TU, 2002. 215 s.
- [8] ŠONOVSKÝ, Pavel. *Omezování emisí oxidů dusíku v granulačních kotlích*. Ostrava: Karolinum, 2005.
- [9] Denitrifikace. Ochrana ovzduší [online]. 2012/2013 [cit. 2016-03-16]. Dostupné z: <http://users.fs.cvut.cz/~vybirpav/Prednasky/Prednaska%20Denitrifikace.pdf>
- [10] *Kde jinde* [online]. [cit. 2016-05-11]. Dostupné z: http://www.kdejinde.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/encyklopedie-energetiky/02/snizovem_5.html
- [11] Air Quality and Compressor. *Texas, United States*. 30.–31. 1.2008 [online]. [Cit. 2.4.2016]. Dostupné z: <http://www.gaselectricpartnership.com/08CatEmission.pdf>
- [12] Selective Noncatalytic Reduction. *Durham, England. October 2000* [online]. [Cit. 2.4.2016]. Dostupné z: <https://www3.epa.gov/ttnecat1/dir1/fsncr.pdf>
- [13] *Plynárenská příručka: 150 let plynárenství v Čechách a na Moravě*. První. Praha: GAS s.r.o, 1997. ISBN 80-902339-6-1.
- [14] BAŠTA, Jiří. *Topenářská příručka: 120 let topenářství v Čechách a na Moravě*. První. Praha: GAS s.r.o, 2001. 8086176827.
- [15] Firemní podklady společnosti TAMEH CZECH s.r.o
- [16] MACHÁČKOVÁ, Adéla. *Průmyslové pece* [online]. 1. vyd. Ostrava: 2003. [cit. 20.1.2016]. Dostupné z: http://www.fmmi.vsb.cz/export/sites/fmmi/modin/cs/studijni-opory/resitelsky-tym-2-metalurgie/prumyslove-pece/Machackova_Prumyslove-pece.pdf
- [17] HAVELKA, Miloslav. *Topné plyny v hutnictví*. První. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1959. ISBN 21320 - 7200/59.
- [18] KONVIČKA, Vladislav. Nejen HORNICTVÍ.info [online]. [cit. 2016-02-11]. Dostupné z: <http://www.hornictvi.info/prirucka/zprac/koksovny/koks.htm>
- [19] Charakteristiky paliv [online]. [cit. 2016-04-16]. Dostupné z: <http://vec.vsb.cz/cs/doc/charakteristiky.pdf>

- [20] ŠONOVSKÝ, Pavel. Posouzení uhlí
- [21] NOSKIEVIČ, Pavel. *Spalování uhlí*. Dostisk. Ostrava: VŠB - TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA, 1995. ISBN 80 - 7078 - 191 -1
- [22] HAŠEK, Pavel. *Tabulky pro tepelnou techniku*. 2. vydání. Ostrava: Vysoká škola báňská, 1980. ISBN 3174091386.
- [23] RÉDR, Miroslav a Miroslav PŘÍHODA. *Základy tepelné techniky*. 1.vydání. 113 02 Praha 1: technické literatury, 1991. ISBN 239424-42605/92.
- [24] Integrovaná prevence a omezování znečištění (IPPC): Referenční dokument o nejlepších dostupných technikách pro VELKÁ SPALOVACÍ ZAŘÍZENÍ. In: Informační portál Ministerstva průmyslu a obchodu [online]. 2010 [cit. 2016-05-01]. Dostupné z: <http://www.ippc.cz/index.php?m=docs&a=getActiveFile&ffid=357>
- [25] NUSSBAUMER, T. Primary and secondary measures for the reduction of nitric oxide emissions from biomass combustion [online]. 1. vyd. Ostrava: 2003. [cit. 15.4.2016]. Dostupné z: http://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-94-009-1559-6_113#page-1
- [26] K. BEJR, M.UHERKA. Provozní předpis pro obsluhu K9, ČEZ, a. s., OJ Teplárny, lokalita Tisová, ETIO 2 066.

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1	Zdroje emisí NO_x v roce 2011 v zemích EEA [6].....	15
Obr. 2	Závislost tvorby NO na teplotě [7].....	16
Obr. 3	Hmotnostní poměr množství emisí [8].....	17
Obr. 4	Závislost NO_x na přebytku vzduchu při dané teplotě [13]	21
Obr. 5	Nízkoemisní směšovací hořák fy Babcock [7].....	24
Obr. 6	Granulační kotel [26]	25
Obr. 7	Procentuální složení vybraných tuhých paliv [19].....	32
Obr. 8.	Výsledky objemového spalování vysokopecního plynu	67
Obr. 9	Výsledky objemového spalování koksárenského plynu.....	69
Obr. 10	Výsledky objemového spalování uhlí	71
Obr. 11.	Praktické spalné teploty vybraných paliv a směsí.....	73
Obr. 12	Chemický nedopal vybraných paliv	74
Obr. 13	Celkový objem spalín vybraných paliv (a).....	74
Obr. 14	Celkový objem spalín vybraných paliv (b)	75

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1. Složení surového koksárenského plynu [18].....	31
Tabulka 2. Složení chemicky upraveného koksárenského plynu [17].	31
Tabulka 3. Chemické složení vysokopecního plynu	34
Tabulka 4. Parametry vysokopecního plynu	35
Tabulka 5. Chemické složení vlhkého vysokopecního plynu	36
Tabulka 6. Objemové spalování VP pro adiabatickou spalnou teplotu ($n = 1$).....	38
Tabulka 7. Objemové spalování VP pro teoretickou spalnou teplotu ($n = 1,05$)	41
Tabulka 8. Porovnání spalných teplot vysokopecního plynu ($n = 1,05$)	42
Tabulka 9. Složení vysokopecního plynu při smíšeném spalování ($n = 0,9$)	43
Tabulka 10. Objemové spalování VP při smíšeném spalování ($n = 0,9$)	44
Tabulka 11. Porovnání spalných teplot vysokopecního plynu při smíšeném spalování ($n = 0,9$)	45
Tabulka 12. Chemické složení koksárenského plynu.....	45
Tabulka 13. Parametry koksárenského plynu	46
Tabulka 14. Chemické složení vlhkého koksárenského plynu	47
Tabulka 15. Objemové spalování KP pro adiabatickou spalnou teplotu ($n = 1$).....	48
Tabulka 16. Objemové spalování KP pro teoretickou spalnou teplotu ($n = 1,1$)	50
Tabulka 17. Porovnání spalných teplot koksárenského plynu	51
Tabulka 18. Složení koksárenského plynu při smíšeném spalování ($n = 0,9$)	52
Tabulka 19. Objemové spalování KP při smíšeném spalování ($n = 0,9$)	53
Tabulka 20. Porovnání spalných teplot koksárenského plynu při smíšeném spalování.....	54
Tabulka 21. Chemické složení uhlí	55
Tabulka 22. Parametry uhlí	55
Tabulka 23. Objemové spalování uhlí pro adiabatickou spalnou teplotu ($n=1$).....	57
Tabulka 24. Porovnání spalných teplot uhlí	58
Tabulka 25 Složení uhlí při smíšeném spalování ($n = 0,9$)	60
Tabulka 26 Objemové spalování uhlí při smíšeném spalování ($n = 0,9$)	61
Tabulka 27. Porovnání spalných teplot uhlí u smíšeného spalování.....	62
Tabulka 28 Složení směsi uhlí a vysokopecního plynu ($n = 1,0$).....	63
Tabulka 29 Porovnání spalných teplot u směsi 85 % uhlí s vysokopecním plynem.....	63
Tabulka 30 Složení směsi uhlí a vysokopecního plynu ($n = 0,9$).....	64
Tabulka 31 Porovnání spalných teplot u směsi uhlí s vysokopecním plynem	64
Tabulka 32. Výsledky spalování u vysokopecního plynu	66
Tabulka 33. Výsledky spalování u koksárenského plynu	68
Tabulka 34. Výsledky spalování uhlí.	70
Tabulka 35. Praktické spalné teploty vybraných paliv	72